



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**BEZPODPOROVÝ 3D TISK NA 6-TI OSÉM ROBOTICKÉM  
RAMENI**

SUPPORTLESS 3D PRINT BY 6-AXIS ROBOTIC ARM

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petr Krejčířík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. David Škaroupka, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Petr Krejčířík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Škaroupka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Bezpodporový 3D tisk na 6–ti osém robotickém rameni**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Výrobní aplikace pomocí 6–osých průmyslových robotů se začaly v posledních letech prudce rozvíjet. Oblast známá pod pojmem "Robotic fabrication" zahrnuje řadu nekonvenčních prototypovacích i výrobních technologií, mezi které patří i robotický 3D tisk. Hlavní výhodou je teoreticky neomezený tiskový prostor a stupně volnosti polohování tiskové hlavy. Omezujícím faktorem tradičního 3D tisku je nutnost existence podpor pro natavený materiál. Vyřešení tohoto problému je jedním z klíčových výzev pro další rozvoj v této oblasti.

Typ práce: výzkumná  
Projekt: TAČR Zéta

### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je navrhnout strategii bezpodporového 3D tisku, provést konstrukční úpravy 3D tiskové hlavy a připravit potřebné skripty pro realizování experimentů na robotu KUKA KR 60 HA.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat možné konstrukční úpravy pro 3D tisk pod úhlem minimálně 50°, navrhnout účinné chlazení a kalibraci polohy trysky
- navrhnout strategie pro bezpodporový 3D tisk,
- realizovat konstrukční úpravy 3D tiskové hlavy,
- navrhnout objekty pro experimentální ověření 3D tisku,
- provést optimalizaci procesních parametrů
- provést experimentální 3D tisk na robotu KUKA KR 60 HA,
- vyhodnotit technologická omezení na základě provedených experimentů

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, výkres sestavení, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

### **Seznam doporučené literatury:**

Rob|Arch 2012: robotic fabrication in architecture, art and design. Editor Sigrid BRELL-COKCAN, editor Johannes BRAUMANN. Wien: Springer, 2013. ISBN 9783709114643.

KNAACK, Ulrich., Tillmann. KLEIN a Marcel. BILOW. Façades. Rotterdam: 010 Publishers, 2008. Imagine (Uitgeverij 010), 01. ISBN 9789064506567.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. Automation in Construction. 2004, 1(13), 5-19. ISSN 0926-5805.

KNAACK, Ulrich., Marcel BILOW, Holger STRAUSS, Behrokh. KHOSHNEVIS a Neil. LEACH. Rapids: layered fabrication technologies for façades and building construction. Rotterdam: 010 Publishers, 2010. ISBN 9789064506765.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

### ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá řešením 3D tisku převislých objemů pomocí robotického manipulátoru KUKA bez realizace podpůrných struktur. 6osé robotické rameno KUKA KR umožňuje modifikaci tiskových strategií oproti klasickému konceptu 3D tisku. Úvodní částí řešení diplomové práce je identifikace současného stavu poznání, především poté stavu zařízení sloužícího pro robotický 3D tisk na Ústavu Konstruování. Pro zvýšení kvality tištěných součástí je nutné provést konstrukční úpravy tiskové hlavy a vytvořit vhodný kalibrační postup. Současně je nutné navrhnout speciální tiskové strategie, pomocí kterých je testován bezpodporový tisk na robotickém rameni. K navrženým tiskovým strategiím jsou vytvořena testovací tělesa pro ověření schopnosti realizace převislých objemů. Pro generování 3D tiskových trajektorií na povrchu tělesa je vyvinut speciální algoritmus v prostředí Grasshopper. Optimalizací procesních parametrů je poté dosaženo zvýšení kvality struktury povrchu tištěného tělesa. Následujícím krokem je experimentální 3D tisk s vyhodnocením kvality povrchu, geometrické přesnosti a soudržnosti vrstev při různých tiskových strategiích.

### KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický 3D tisk, bezpodporový 3D tisk, FFF, robotická výroba

### ABSTRACT

This diploma thesis deals with the solution 3D printing by KUKA robotic arm without realization of supporting structures. The 6-axis KUKA KR 60HA robotic arm allows adjusting 3D printing strategies compared to classical 3D printing concept. The first part of the diploma thesis is about the identification of the current state of knowledge, especially the state of the experimental device for the robotic 3D print. To improve quality of the printed is necessary to modify the printing head and develop the suitable calibration principle. Special printing strategies were designed to reach the 3D printing overhead volumes without creating support structure. A special algorithm in the Grasshopper environment was developed for generating 3D print trajectory on the body surface. For the quality improvement it is necessary to optimize the process parameters. The final step is experimental 3D printing with the evaluation of surface dimensions, geometric precision and layer coherence in various printing strategies.

### KEYWORDS

Robotic 3D print, supportless 3D printing, FFF, robotic fabrication



**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KREJČÍŘÍK, P. *Bezpodporový 3D tisk na 6-ti osém robotickém rameni*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Škaroupka, Ph.D..





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D. za vedení této práce, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu během mého studia.

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Bezpodporový 3D tisk na 6-osém robotickém rameni vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Davida Škaroupky, Ph.D. s využitím odborné literatury, svých znalostí a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 18.5.2018

.....  
KREJČÍŘÍK PETR



**OBSAH**

<b>1 ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1 Princip metody FFF	15
2.1.1 Tvorba trajektorie	15
2.1.2 Extruze materiálu	16
2.1.3 Podpůrná struktura	17
2.1.4 Vhodné materiály	17
2.1.5 Procesní parametry	18
2.2 Robotický a bezpodporový 3D tisk	20
2.2.1 FrameFab	20
2.2.2 Tsinghua University	21
2.2.3 Material IAAC	23
2.2.4 AI Build	24
2.2.5 Stratasys	24
2.2.6 EgyRobo	25
2.2.7 Curvoxels	25
2.2.8 WirePrint	26
2.2.9 ZHAW	26
2.3 Experimentální zařízení robotického 3D tisku	27
2.3.1 Konstrukční řešení	28
2.3.2 Ovládání tiskové hlavy	29
2.3.3 Ovládání robotického ramene	30
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>31</b>
3.1 Analýza problému	31
3.1.1 Nedostatky experimentálního zařízení	31
3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	32
3.2 Podstata a cíle diplomové práce	32
<b>4 MATERIÁL A METODY</b>	<b>33</b>
4.1 Návrh tiskových strategií	33
4.1.1 Přerušovaný/Kontinuální tisk	34
4.1.2 Fixní hlava/Fixní stůl	34
4.1.3 Náklon tiskové hlavy	34
4.1.4 Volba roviny podložky	35
4.2 Konstrukční úpravy tiskové hlavy	37
4.2.1 Tryska	37
4.2.2 Nástavec pro kalibraci	40
4.2.3 Systém chlazení	40
4.3 Návrh testovacích objektů	44
4.3.1 Otevřená stěna	44
4.3.2 Spirální váza	45
4.3.3 Zakřivený tubus	45
4.4 Generování trajektorie	46
4.4.1 Tvorba a seřazení bodů	46
4.4.2 Náklon tiskové hlavy vůči rovině XY	50
4.4.3 Natočení tiskové hlavy v ose Z	51
4.5 Optimalizace procesních parametrů	52
4.5.1 Rychlost koncového bodu nástroje	52
4.5.2 Výška vrstvy	52
4.5.3 Teoretický výpočet množství extrudovaného materiálu	52
4.5.4 Vliv chlazení tištěné součásti	54
4.6 Experimentální 3D tisk	54
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>55</b>

5.1	Konstrukční úpravy tiskové hlavy	55
5.2	Úprava ovládacího panelu tiskové hlavy	55
5.3	Pohyb robotického ramene	55
5.4	Optimalizace procesních parametrů	56
5.4.1	Rychlost koncového bodu nástroje	56
5.4.2	Tloušťka stěny tělesa	57
5.4.3	Nezávislost množství bodů na rychlosti	57
5.4.4	Vliv chlazení	58
5.4.5	Výška vrstvy	58
5.5	Experimentální tisk	59
5.5.1	Ověření funkčnosti sliceru	59
5.5.2	Spirální váza s převislým objemem	60
5.5.3	Otevřená plocha s převislým objemem	64
5.5.4	Zakřivený tubus s převislým objemem	65
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>67</b>
6.1	Vyhodnocení experimentů	67
6.2	Výhody technologie	67
6.2.1	Tisk s náklonem hlavy	67
6.3	Zjištěné problémy, limity technologie	67
6.3.1	Výkon topného tělesa	67
6.3.2	Upevnění trysky	68
6.3.3	Regulace průtoku vzduchu	68
6.3.4	Úchyt tiskové hlavy na vřetení	68
6.3.5	Maximální náklon tiskové hlavy	69
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>79</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>81</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>83</b>

### 1 ÚVOD

V současné době dochází k rapidnímu nárůstu oblastí, ve kterých nachází uplatnění výroba prototypů nebo produktů pomocí metody Fused Filament Fabrication (FFF). Díky aditivnímu principu dochází k výrazné úspoře materiálu vůči klasické konvenční výrobě (např. obrábění nebo odlévání). Jelikož je materiál nanášen do volného prostoru (nefiguruje zde žádná forma), nese s sebou technologie určitá omezení. Pod nanášenou vrstvou materiálu je potřebné vytvořit strukturu, na kterou bude nanášeno roztavené vlákno. V ideálním případě se jedná o strukturu, která je součástí tělesa. Ne vždy ale lze takto požadovanou součást navrhnout. V případě tisku převisů (např. otvory nebo mosty) není součástí navrženého modelu struktura, na kterou by byl materiál nanášen. V tomto případě je nutné vytvořit podpůrnou strukturu, která slouží pouze jako základna pro nanášení materiálu. Po dokončení tisku je tato struktura v rámci post-processingových kroků odstraněna.

Při realizaci podpůrných struktur dochází k nárůstu výrobního času, ekonomických nákladů a doby strávené dokončovacími úpravami vytvořeného tělesa. Díky tomu se výroba stává méně efektivní a také dražší.

Klasické koncepty 3D tiskáren jsou realizovány se 3 stupni volnosti, zajišťujícími pohyb ve třech osách souřadného systému XYZ. Robotické rameno KR 60HA od společnosti KUKA je vybaven 6 stupni volnosti, které navíc umožňují nástroji náklon okolo všech 3 os souřadného systému. Díky tomu nachází robotické rameno uplatnění např. při obrábění složitějších součástí, které je nutné obrábět z několika směrů. Dochází tak k zefektivnění výroby, jelikož není nutné při dokončení obráběné plochy otáčet a znovu upínat obrobek. Při procesu 3D tisku je možné realizovat nanášení materiálu s naklopenou tiskovou hlavou. Díky změně směru nanášení materiálu dochází k odlišenému silovému rozložení v místě tisku, což může mít za následek dosažení daleko větších převisů bez užití podpůrných struktur v porovnání s klasickým konceptem 3D tiskáren. Výhodou robotického pracoviště je taktéž několikanásobně větší pracovní prostor, díky čemuž lze realizovat velkorozměrové produkty.



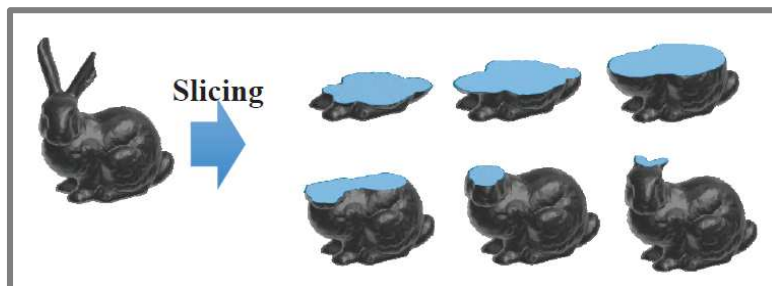
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Princip metody FFF

Metoda Fused filament fabrication (FFF) popisuje nanášení roztaveného materiálu v tenkých vrstvách. Postupným skládáním vrstev je tvořen fyzický model.

#### 2.1.1 Tvorba trajektorie

Správná distribuce materiálu je zajištěna trajektorií nástroje (případně podložky) generované z virtuálního modelu. Materiál je nanášen ve většině případů v postupných vrstvách. (viz Obr. 2-1).



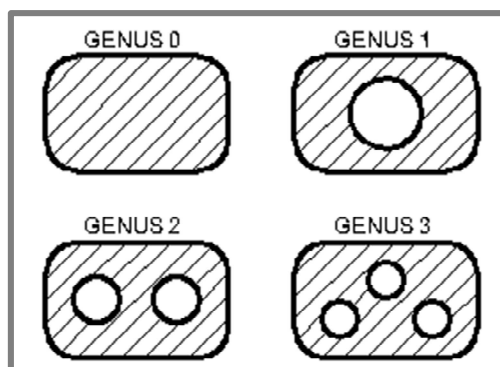
Obr. 2-1: Rozdělení modelu na vrstvy [1]

Vstupní informací pro tvorbu trajektorie je CAD model. Prvním krokem je rozdělení modelu na vrstvy. Následně probíhá výpočet optimální trajektorie v dané vrstvě s ohledem na optimalizaci pohybu a ostatních procesních parametrů. Programy pro generování trajektorie nejčastěji pracují se vstupními formáty STL, 3MF nebo OBJ. Je tedy nutné přizpůsobit výstupní formát CAD modelu požadavkům softwaru. V průmyslu existuje několik desítek programů zabývajících se generováním trajektorie CAD modelu.

Jedná se například o:

- Slic3r [2]
- 3DPrinterOS [3]
- Cura [4]

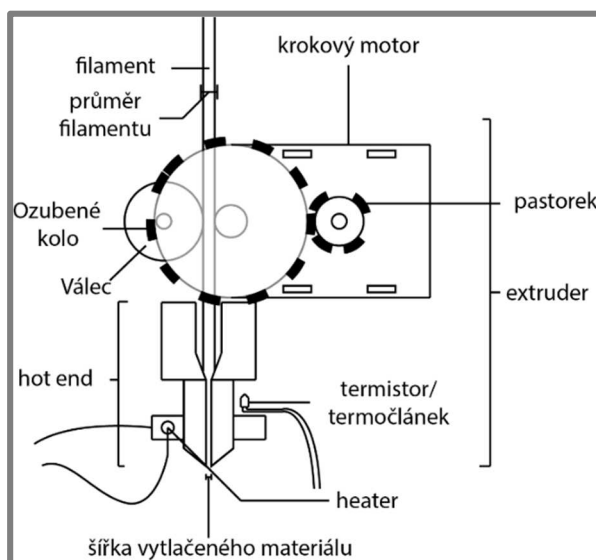
Trajektorie nanášení materiálu je závislá na topologii tělesa. Z hlediska topologie je pro potřeby projektu klíčovou vlastností Genus. Termín Genus popisuje počet skupin křivek náležících objemu tělesa. Každá skupina je obsažena křivkami, které lze stáhnout do jediného bodu ležícího v dané množině [5]. Zjednodušeně se dá tento termín vyložit, že genus je definován počtem děr nebo otvorů v tělese (viz Obr. 2-2).



Obr. 2-2: Genus topologie pro 2D tělesa

### 2.1.2 Extruze materiálu

Materiál (filament) je z plastové cívky nanášen na podložku tiskárny pomocí extruderu (viz Obr. 2-3).



Obr. 2-3: Schéma extruderu [6]

Plastový filament je do *extruderu* veden pomocí válců. Zpravidla bývá jeden válec poháněný krokovým motorem a druhý slouží jako unášec. Řízením otáček krokového motoru je docílena regulace množství nanášeného materiálu. V *hotendu* poté dochází vlivem tepla z *topného tělesa* (*heateru*) k roztavení materiálu. Ten je poté nanášen na příslušné místo ve vrstvě pomocí trysky. Pohyb po definované trajektorii je u klasických 3D tiskáren určen G-kódem, který taktéž slouží pro ovládání např. CNC strojů. Po vytlačení tryskou se materiál pojí s již naneseným plastem. Postupným chladnutím dochází k tunutí materiálu. Po dokončení tisku vrstvy je proveden posun extruderu nebo podložky v ose Z o velikost jedné vrstvy. Poté je spuštěno nanášení materiálu do další vrstvy. Takto je postupně nanášena vrstva po vrstvě až do dokončení tištěného modelu.

Po dokončení procesu tisku následují post-processingové kroky. U klasické metody FFF se jedná například o odstranění podpůrného materiálu nebo povrchové úpravy tělesa. Součástí post-processingu jsou taktéž mechanické úpravy tělesa – např. vrtání děr nebo frézování drážek, které jsou z hlediska 3D tisku příliš finančně a časově nákladné. Povrchové úpravy modelu lze provádět mechanicky (broušení, leštění) nebo chemicky (např. acetonovými parami [7]).



### 2.1.3 Podpůrná struktura

Podpůrná struktura slouží jako základna pro nanášení materiálu u velkých úhlů převisu. Materiál by byl bez podpůrné struktury nanášen do volného prostoru a vlivem gravitace by padal směrem k podložce. Podpůrná struktura zajišťuje polohu tištěných vrstev v daném místě. Po dokončení tisku je tento přídatný materiál mechanicky nebo chemicky odstraněn.

### 2.1.4 Vhodné materiály

Mezi základní požadavky na materiály určené pro metodu FFF patří: [8]

- Nízká teplota skelného přechodu ( $T_g$ )
- Nízká teplota tavení ( $T_m$ )
- Nízká smrštivost při tuhnutí
- Přiměřená hodnota indexu tekutosti taveniny
- Dostatečné mechanické vlastnosti (pevnost, tuhost, pružnost a tažnost) v tuhém stavu

#### Teplota skelného přechodu – $T_g$

Jedná se o teplotu přechodového stavu mezi kaučukovitým a skelným stavem. V oblasti skelného stavu (teplota je nižší než  $T_g$ ) dosahuje materiál vysoké tvrdosti, pevnosti a modulu pružnosti. Při teplotě skelného přechodu dochází ke skokové změně těchto vlastností až o několik řádů. Materiál se stává lépe tvárný.

#### Teplota viskózního toku – $T_f$

Při této teplotě dochází ke skokové změně modulu pružnosti na nulovou hodnotu. Materiál tak ztrácí soudržnost makromolekul a dochází k jejich vzájemnému pohybu [9]. Polymer se mění na taveninu. Pro nanášení materiálu technologií 3D tisku je nutné polymer zahřát na tuto teplotu.

#### Smrštivost

Popisuje změnu délkové nebo objemové jednotky při poklesu teploty o 1 K. Jelikož tisk v rámci tohoto výzkumu probíhá na nezahřívanou podložku, pokles teploty je prudší, než je tomu u klasických konceptů 3D tiskáren. Proto je nutné držet hodnotu smrštivosti na minimu.

#### Index tekutosti taveniny

Index tekutosti taveniny (Melt Flow Index – MFI) je určen množstvím hmotnosti materiálu, které proteče kapilárou za dobu 10 minut [9]. Vyšší hodnota MFI tedy znamená vyšší tekutost polymeru. Při tisku převislých objemů nedosahuje materiál s vysokým MFI dostatečné adheze mezi vlákny a bortí se ve směru působení gravitační síly. Snahou je tedy hledání materiálů s nízkou hodnotou MFI.

Nejvyužívanější materiály FFF jsou např. ABS, PLA, PC nebo PET.

#### a) Acrylonitril-butadien-styren (ABS)

Jedná se o amorfní termoplastický polymer. Skládá se z očkovaného Polybutadienu a Styren-Acrylonitrilu [10]. Mezi hlavní výhody materiálu patří vysoká odolnost vůči mechanickému opotřebení, tuhost a houževnatost [11]. Pro potřeby 3D tisku je nutné při průchodu tryskou zahřát materiál na 200 - 250 °C. Cena filamentu je pohybuje v rozmezí 500 – 700 Kč [12] za kg materiálu.

#### b) Polylactic Acid (PLA)

Společně s ABS se jedná o nejpoužívanější materiál při tisku FFF technologií. Oproti ABS dosahuje snadnější a rychlejší zpracovatelnosti při stejných podmínkách, avšak je méně odolný vůči vyšším teplotám. PLA není tolik náchylné k deformacím vlivem chladnutí materiálu. Při

tisku tímto materiálem tedy není nutné vyhřívat podložku, na kterou je nanášen materiál. Potřebná teplota pro tisk materiálu je okolo 180 - 220 °C [13].

### c) Polycarbonate (PC)

PC je termoplastický polymer užívaný také v technologiích vstřikování plastů nebo lisování za tepla. Tyto materiály mají vysokou odolnost vůči nárazům a mechanickému opotřebení, dobrou tepelnou odolnost a přívětivé optické vlastnosti. Požadovaná teplota pro roztavení materiálu při 3D tisku je přibližně 300 °C [14].

### d) Polyethylene Phthalate (PET-G)

Řadí se mezi „ekologické“ plastové materiály, jelikož je snadněji recyklovatelný oproti výše zmíněným materiálům. Příměs Glykolu do klasického PET zabraňuje krystalizaci materiálu při ohřevu a následném chladnutí [15]. Díky tomu je materiál houževnatější a má kvalitnější optické vlastnosti oproti standardnímu PET. Provozní teplota pro proces 3D tisku se pohybuje v okolí 260 °C. Výhodou PET-G je nízká smrštitost.

### Porovnání materiálových charakteristik

U výše zmíněných materiálů bylo provedeno porovnání teploty skelného přechodu, teploty tavení, pevnosti v tahu a ohybu a lineárního smrštění (viz Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Porovnání materiálových charakteristik [16] [15]

<b>Materiál</b>	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>PC</b>	<b>PET-G</b>
Teplota skelného přechodu [°C]	85	68	161	70
Teplota viskózního toku [°C]	230	210	280	260
Index tekutosti taveniny (MFI) [g/10min]	1-36	6-78	1,8 - 26	5,38
Pevnost v tahu [MPa]	37-110	65	68	53
Pevnost v ohybu [MPa]	65	68	104	77
Smrštitost [ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ]	73,8	55	70,2	68

Z hlediska vlastností struktury součástí vyrobené pomocí metody FFF je klíčovým parametrem hlavně teplota skelného přechodu, která ovlivňuje navazování jednotlivých vláken (více v kapitole 2.1.5). Největší rozdíl hodnot mezi teplotou viskózního toku a teplotou skelného přechodu vykazuje materiál PET-G.

Jelikož v rámci projektu dochází k nanášení materiálu na nevyhřívanou podložku, je vhodné zvolit materiál s co nejnižší hodnotou lineárního smrštění (ovlivňuje deformaci materiálu po zchladnutí součásti). Z tohoto hlediska jako vhodné materiály vychází PLA a PET-G.

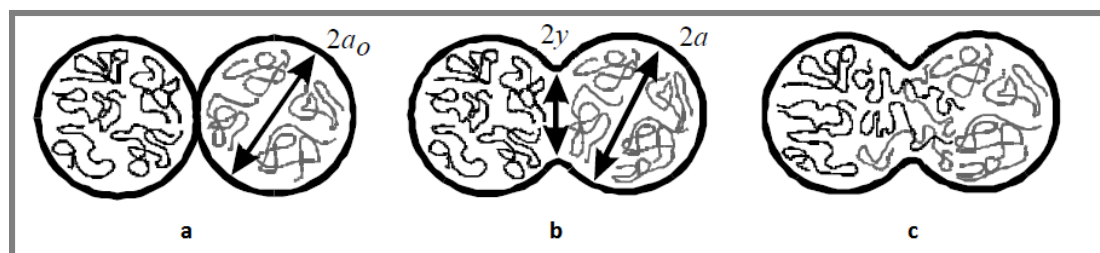
Hodnota MFI je u materiálu PLA výrazně vyšší, než u ABS a PC. To může způsobit komplikace při tvorbě převislých objemů, jelikož materiál dosahuje vyšší viskozity.

### 2.1.5 Procesní parametry

#### Spoj mezi vlákny

Ke vzájemnému spoji vláken dochází ve třech různých módech (viz Obr. 2-4): [8]

- Povrchový kontakt – vlákna se pouze vzájemně dotýkají svými povrchy, dochází k nulovému překrytí
- Studený spoj – dochází ke spoji vláken bez difúze materiálu při teplotách nižších, než je teplota skelného přechodu nanášeného materiálu. Mezi vlákny se tvoří krček.
- Pevný spoj – dochází ke spoji vláken s difúzí materiálu při teplotách vyšších, než je teplota skelného přechodu nanášeného materiálu

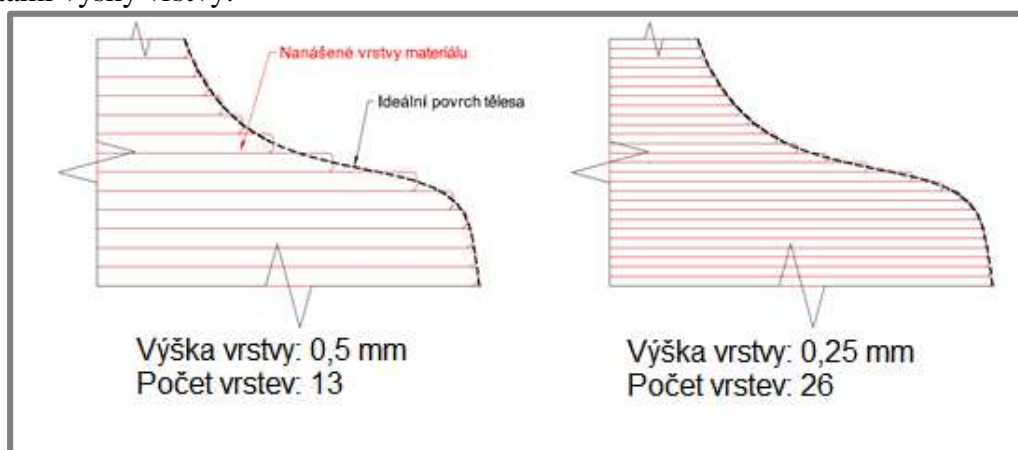


Obr. 2-4: Možné módy spoje mezi dvěma vlákny [8]

Pokud je vzdálenost mezi středy nanesených vláken větší než  $2 \cdot a$ , vytvoří se vzduchová mezera. Ta má negativní vliv na mechanické vlastnosti, jelikož dochází ke snížení soudržnosti tělesa. U velkorozměrných tisků se vzduchová mezera vytváří záměrně z důvodu úspory materiálu. Díky vzniklým mezerám také dochází ke kvalitnějšímu odvodu tepla [17].

### Výška vrstvy

Výška vrstvy má výrazný podíl na kvalitě povrchu tělesa. Na Obr. 2-5 je na řezu tělesem zobrazeno porovnání přesnosti tištěného tělesa při nanášení materiálu s dvěma různými hodnotami výšky vrstvy.



Obr. 2-5: Nanášení materiálu s různou výškou vrstvy

S rostoucí výškou vrstvy klesá počet bodů interpolujících povrch tělesa ve vertikálním směru. Vyšší počet vrstev má za vliv vyšší teplotní gradient skrze součást [17]. Díky tomu dochází ke kvalitnější difúzi jednotlivých vláken materiálu a tím jsou navýšeny pevnostní vlastnosti tělesa. Větší počet vrstev však také znamená fluktuaci teploty již naneseného materiálu, což má za následek větší hodnoty vnitřního pnutí. Tím dochází ke snížení pevnosti, tvorbě pórů, praskání vrstev nebo geometrické nepřesnosti tištěného modelu vůči vstupním datům.

### Vliv teploty

Pro zajištění difuzního spoje mezi vlákny je nutné udržet teplotu materiálu nad teplotou skelného přechodu. Většina 3D tiskáren k tomu využívá vyhřívanou podložku nebo komoru, která přenáší teplo do vytištěné součásti.

V případě absence vyhřívané podložky jsou klíčovými vlastnostmi materiálu jeho tepelná kapacita a tepelná vodivost. Tepelná kapacita definuje množství dodaného tepla, při kterém dojde k nárůstu teploty o 1K. Tepelná vodivost popisuje rychlost šíření teploty v tělese. Tab. 2-2 zobrazuje porovnání součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity výše popsaných materiálů.

Tab. 2-2: Porovnání tepelných vlastností materiálů [16]

Materiál	Měrná tepelná kapacita [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
ABS	1470	0,17
PLA	1800	0,13
PET-G	1200	0,29

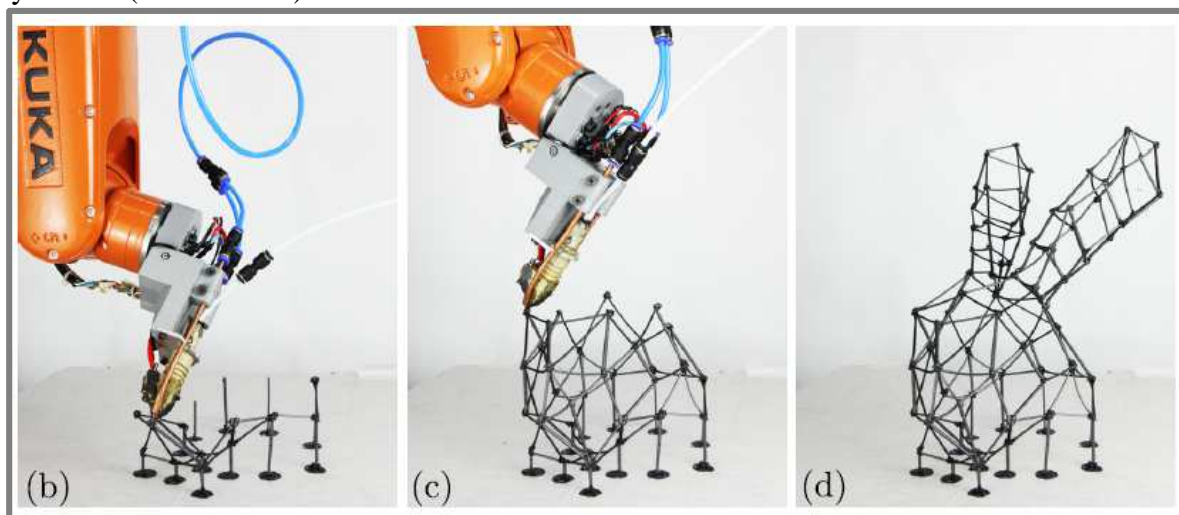
Kvůli vysoké hodnotě měrné tepelné kapacity je u materiálu PLA potřeba vyššího výkonu topných těles pro ohřev materiálu, než je tomu u materiálů ABS nebo PET-G. Díky nízké tepelné vodivosti je teplo udržováno ve vrstvě, kde bylo roztaveným materiálem dodáno. To znamená, že v horní vrstvě dochází k pomalejšímu poklesu teploty. Při dostatečně vysoké rychlosti tisku tak lze dosáhnout spoje vláken při teplotě vyšší, než je teplota skelného přechodu, což má za důsledek difúzi mezi vlákny. Díky tomu se spoj stává výrazně pevnějším.

## 2.2 Robotický a bezpodporový 3D tisk

Výhodou robotického 3D tisku oproti klasickému konceptu je především větší pracovní prostor. Díky 6 stupňům volnosti lze realizovat trajektorii odlišnou od standardních 3D tiskáren, kde probíhá tisk vrstvu po vrstvě. Většina zařízení se zabývá velkorozměrovým tiskem, kde je výplň součásti tvořena pomocí prutů a styčníků.

### 2.2.1 FrameFab

Článek [18] od autorů Y. Huang a kol. prezentuje vývoj technologie 3D tisku prutových konstrukcí pomocí robotického ramene KUKA. Materiál není v tomto případě nanášen ve formě vzájemně propojených vrstev, ale jako samostatná vlákna, která jsou spojena ve styčnících (viz Obr. 2-6).



Obr. 2-6: Robotický 3D tisk prutové konstrukce [18]

Každý prut má průměr o rozměru vytlačovaného filamentu z extruderu a je ohraničen 2 uzly prutové konstrukce. Požadavkem při návrhu prutové konstrukce je vnitřní a vnější statická určitost [18].

Materiál je nanášen pomocí speciální tiskové hlavy s tryskou spojenou s heatblokem. Ohřev materiálu je realizován pomocí dvou topných patron. Chlazení vytištěné součásti je zajištěno pomocí stlačeného vzduchu. Proudění je regulováno solenoidovým ventilem, který je propojen

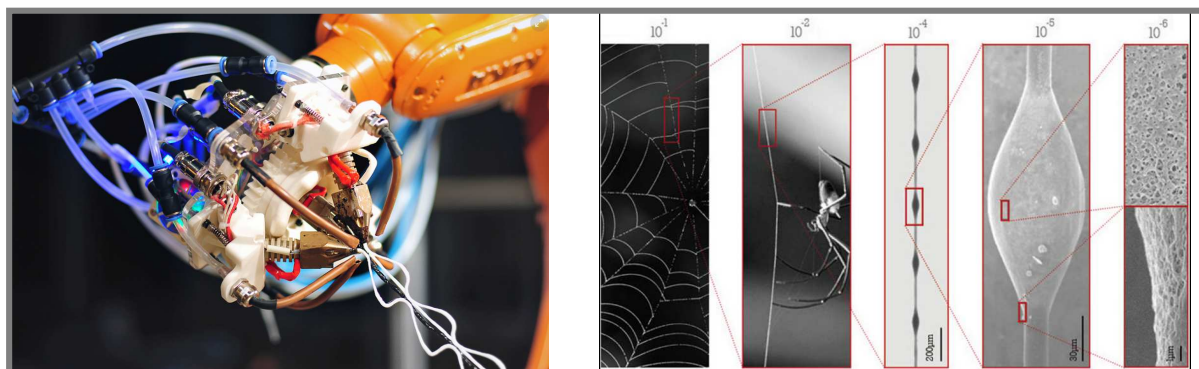


s řídicí jednotkou robotického ramene [18]. S tou komunikuje také microcontroller Arduino zajišťující řízení krokového motoru pro přísun materiálu a výhřevu heatbloku.

Experimenty probíhají při rychlosti koncového bodu ramene  $0,001 - 0,009 \text{ m s}^{-1}$  a s chlazením proudem vzduchu se vstupním tlakem  $0,02 \text{ MPa}$  [18].

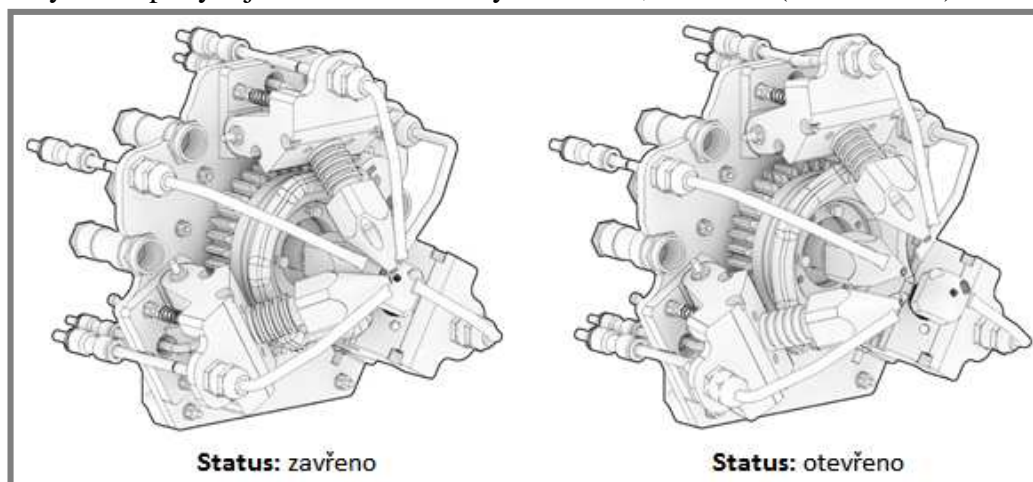
### 2.2.2 Tsinghua University

Zařízení [19] nanáší materiál ve formě prutů, stejně jak je tomu u zařízení FrameFAB [18]. Výrazný rozdíl je však ve tvaru prutů. Základní geometrie prutu nanášená hlavní tryskou je zpevňována pomocí přídatných vláken (viz Obr. 2-7a), které zajišťují stabilitu prutu. Díky tomu se struktura stává samonosnou. Geometrie prutu nachází inspiraci v pavoučí síti, kde je docíleno zpevnění sítě pomocí zesílení vláken (Obr. 2-7b).



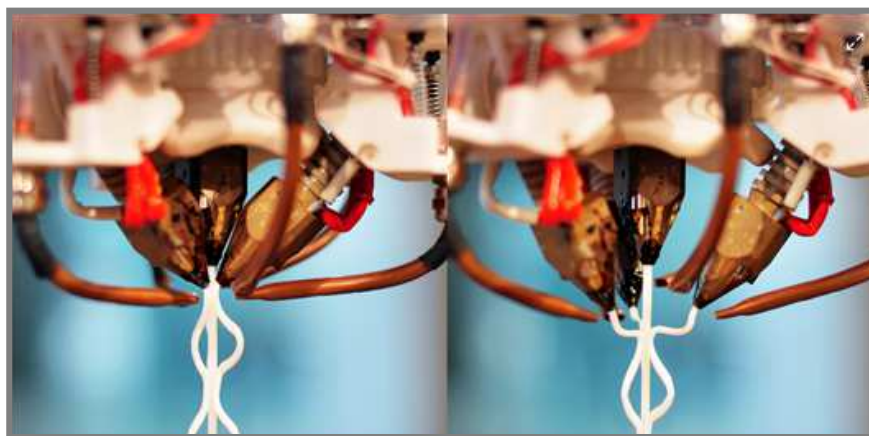
Obr. 2-7: Geometrie prutu (a), zesílení pavoučí sítě (b) [19]

Tisková hlava se skládá z hlavní trysky, která je vůči koncovému bodu robotického ramene umístěna nehybně. Další 3 trysky sloužící pro nanášení přídatných vláken jsou uloženy kyvně. Náklon trysek se pohybuje mezi dvěma stavy – zavřeno, otevřeno (viz Obr. 2-8).



Obr. 2-8: Pozice trysek pro přídatná vlákna v krajních polohách [19]

Tento typ uložení umožňuje tvorbu smyček, které zvyšují model průřezu v ohybu. Velikost smyček (viz Obr. 2-9) je určena rychlostí extruze a převodovými poměry v tiskové hlavě.

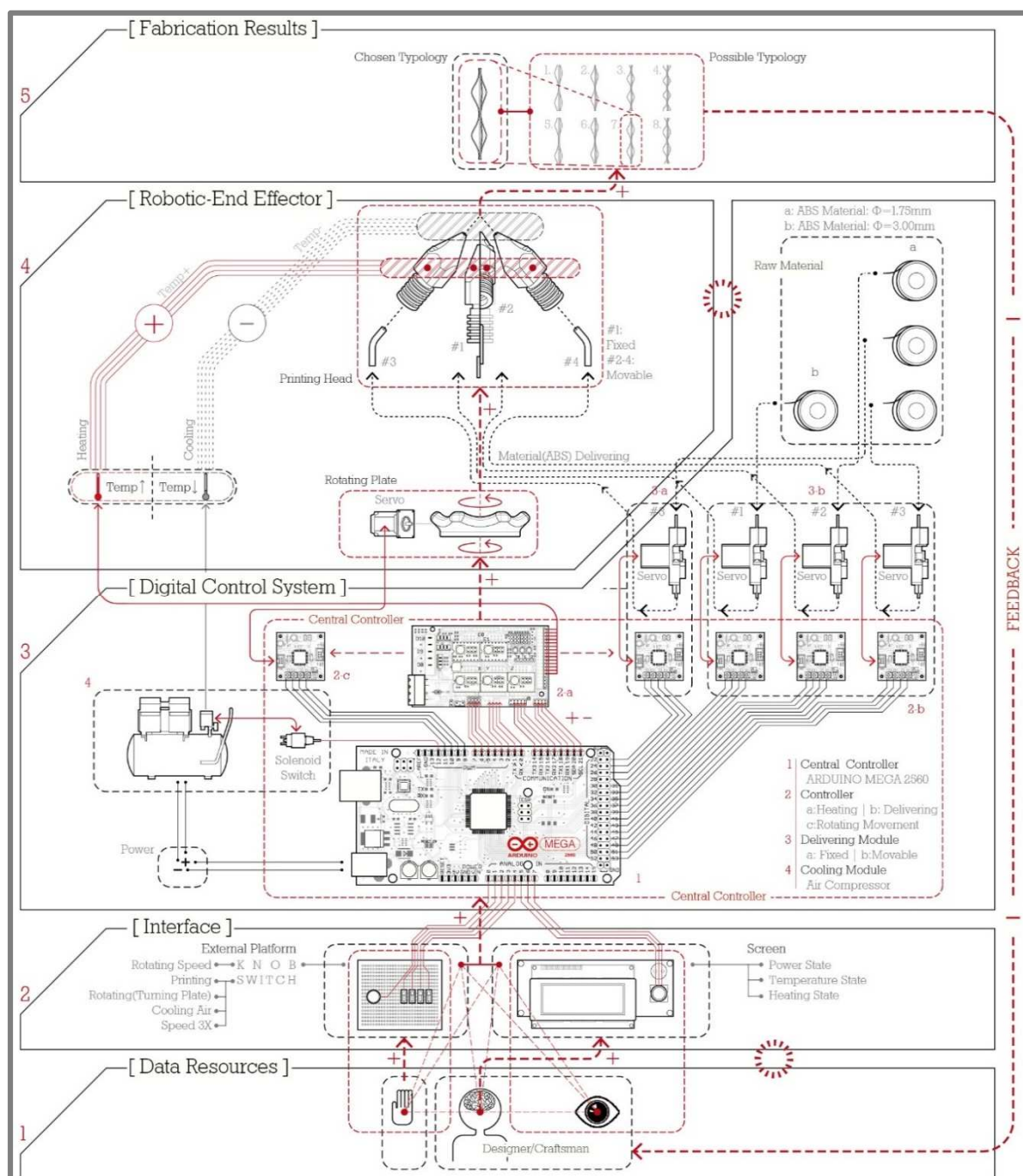


**Status: zavřeno**

**Status: otevřeno**

**Obr. 2-9:** Nanášení materiálu dle popsané geometrie [19]

Ovládání extruderu tiskové hlavy je zajištěno pomocí microcontrolleru Arduino MEGA. Zařízení je vybaveno 6 servomotory – 4 slouží pro vedení filamentu do trysek, 1 pro zajištění rotačního pohybu desky, která generuje pohyb trysek pro nanášení přídavných vláken a 1 pro přísun filamentu do trysek. Každý sektor s tryskou obsahuje systém pro zahřívání materiálu v trysce a hadice se stlačeným vzduchem pro chlazení materiálu po extruzi. To je řízeno pomocí solenoidového ventilu, regulujícího průtok vzduchu. Rychlost extruze a rotaci je možné regulovat na ovládacím panelu. Schéma zařízení je zobrazeno na Obr. 2-10.



Obr. 2-10: Schéma zařízení na Tsinghua University [19]

## 2.2.3 Mataerial IAAC

Autoři P. Novikov a S. Jokič z barcelonské IAAC (Institute of Advanced Architecture of Catalunya) sestrojili zařízení [20] (Obr. 2-11) pro tisk těles ve formě prutů. Při tisku je užíváno termosetových pryskyřic. Materiál je uložen ve dvou nádobách, ze kterých je distribuován do trysky. Díky chemické reakci při smíchání a systému chlazení po nanesení tryskou okamžitě tuhnou [20]. Dostatečnou tuhost tělesa vedle chemického složení zajišťuje také masivní šířka sloupce nanášeného materiálu.

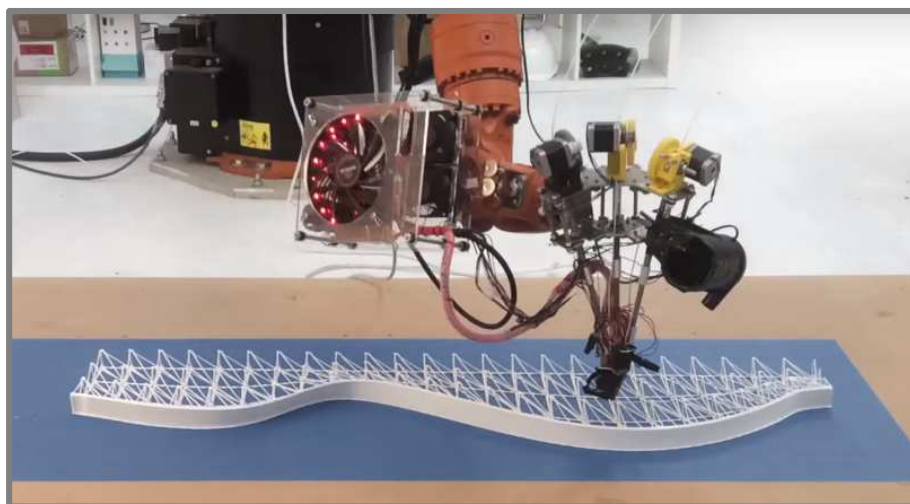


Obr. 2-11: Zařízení na IAAC Barcelona [20]

### 2.2.4 AI Build

Londýnská společnost se zabývá robotickým velkorozměrovým 3D tiskem především v oblasti architektury [21]. Pro tvorbu těles pomocí této aditivní technologie využívají především klasických materiálů – ABS a PLA, nicméně v budoucnu má společnost v plánu rozšířit tuto technologii i pro 3D tisk kovů nebo betonu [21].

Nanášení materiálu je realizováno pomocí speciální 3D tiskové hlavy (viz Obr. 2-12) s vyrobenou tryskou s menším vrcholovým úhlem oproti klasickým tryskám. Chlazení výtisku je zajištěno dvěma ventilátory připevněnými nad tryskou. Při tisku nedochází k naklápění koncového bodu tiskové hlavy – tisk probíhá pouze v rovinách rovnoběžných s rovinou XY. Tryskou jsou nanášeny prutové konstrukce sloužící jako výplň materiálu. Povrch tělesa je realizován jako plný - nanášením materiálu vrstvu po vrstvě. Součástí zařízení je taktéž kontrola pomocí optického skeneru.



Obr. 2-12: Zařízení AI Build [22]

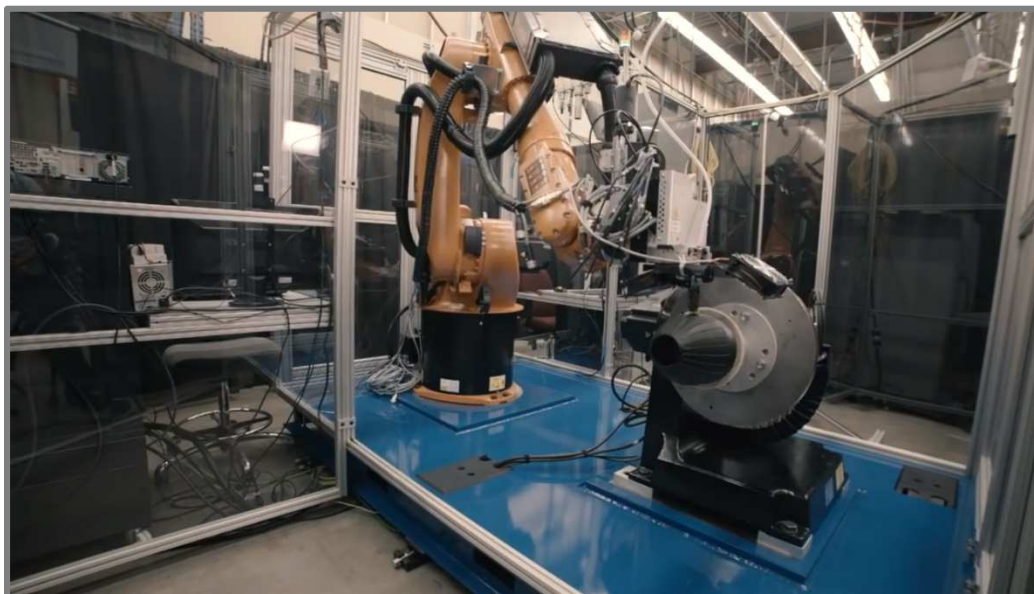
### 2.2.5 Stratasys

Společnost Stratasys realizuje bezpodporový 3D tisk kompozitních materiálů pomocí 6-osého robotického ramene KUKA a 2-osého rotačního stolu (viz Obr. 2-13) [24]. Díky celkovým 8 stupňům volnosti lze nastavit libovolné polohy tištěné součásti vůči tiskové hlavě. Náklonem



tiskové hlavy a rotačního stolu lze realizovat tisk tvarově složitých součástí bez užití podpůrné struktury. Kompozitní materiály mají výhodu především v poměru pevnosti vůči hmotnosti, a proto nacházejí uplatnění např. v leteckém nebo automobilním nebo kosmickém průmyslu. Hlavním úskalím použití těchto materiálů je při standardním užívání především náročná zpracovatelnost a výrazně omezená výsledná geometrie [24]. Tyto problémy odpadají právě při aplikaci robotického 3D tisku.

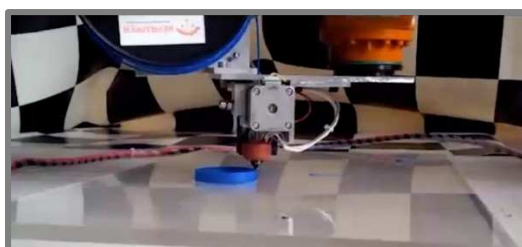
Tisková hlava je vybavena zásobníkem materiálu, který je dodáván do trysky. Po nanesení je materiál chlazen prostřednictvím dvou ventilátorů. Vývoj zařízení probíhá ve spolupráci se společností Siemens, která zajišťuje kinematiku, generování trajektorie a design součástí pro aplikaci robotického 3D tisku.



Obr. 2-13: Zařízení Stratasy 3D Demonstrator [24]

### 2.2.6 EgyRobo

Oproti předchozím zařízením se jedná o klasický 3D tisk vrstvu po vrstvě. Nanášení materiálu je realizováno pomocí speciální tiskové hlavy (Obr. 2-14) umístěné na koncovém efektoru robotického ramene KUKA. Z dohledaných informací vyplývá, že tisk probíhá pouze v horizontální poloze bez náklonu tiskové hlavy [26]. Experimenty jsou omezeny na jednoduché součásti – např. plášť válce nebo kvádr. Zařízení není vybaveno chladičem tištěné součásti.

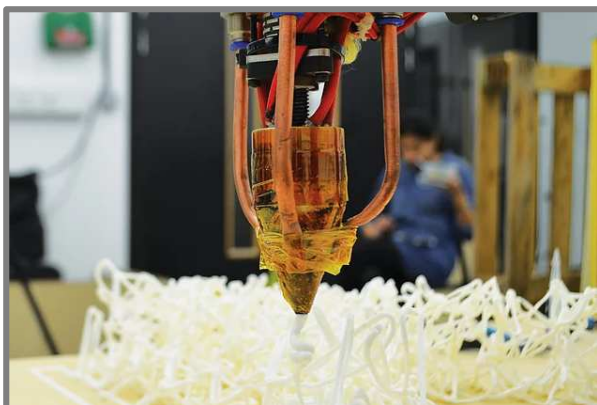


Obr. 2-14: Zařízení EgyRobo [26]

### 2.2.7 Curvoxels

Zařízení společnosti Curvoxels (Obr. 2-15) pracuje na principu nanášení kontinuální linie materiálu. Ohřev plastu v trysce je zajištěn pomocí několika topných patron dodávajících dostatečný výkon pro potřebnou rychlost vytlačování materiálu. Průměr vytlačovaného

materiálu je dán velikostí otvoru v trysce, které jsou vyrobeny ve variantách 4, 5 nebo 6 mm [28]. Díky systému chlazení stlačeným vzduchem dochází k rychlému tuhnutí materiálu.

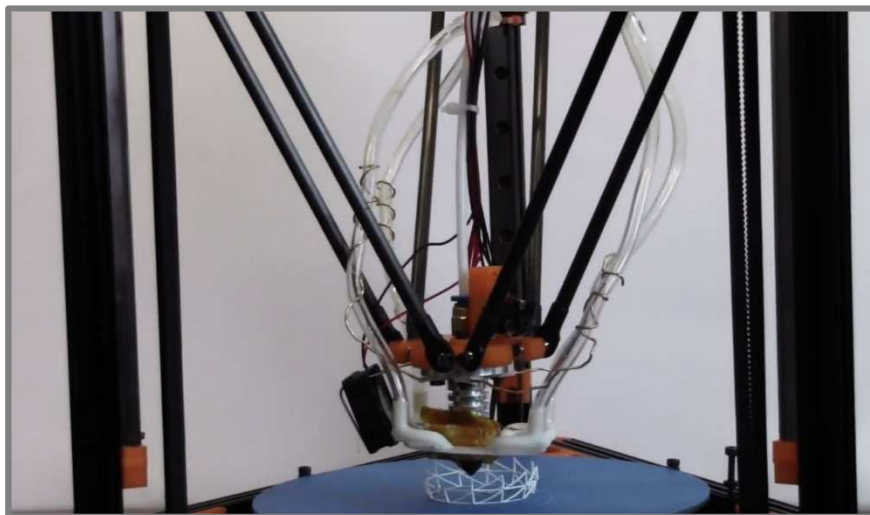


Obr. 2-15: Zařízení Curvoxels [28]

### 2.2.8 WirePrint

Pro zkrácení času výroby designérských prototypů bylo ve spolupráci Hasso Plattner Institutu v Potsdam, Německu a Cornellovy Univerzity v Ithace, USA vyvinuto zařízení pro tisk skeletových konstrukcí [29]. Díky kratší trajektorii lze dosáhnout zkrácení výrobních časů až na 10 % oproti klasickému nanášení materiálu vrstvu po vrstvě.

Tisk je realizován pomocí delta 3D tiskárny (Obr. 2-16) bez náklonu tiskové hlavy. Chlazení tištěné součásti je uskutečněno pomocí stlačeného vzduchu. Princip nanášení materiálu ve formě prutů lze kombinovat s klasickým konceptem tisku vrstvy po vrstvě, díky čemuž lze docílit zpevnění tělesa v namáhaných oblastech [29].



Obr. 2-16: Zařízení WirePrint [29]

### 2.2.9 ZHAW

V rámci studentského projektu bylo na ZHAW (Zurich University of Applied Sciences) vyvinuto zařízení [23] pro bezpodporový 3D tisk (viz Obr. 2-17). Oproti zařízení, které jsou popsány v předchozím textu, je zde nanášení materiálu prováděno s tiskovou hlavou, kterou lze

díky zavěšení ve tvaru delta pohybovat v ose Z a naklápět ve třech rovinách. Ostatní pohyby nutné pro nanesení materiálu do požadovaného místa jsou zajištěny podložkou.



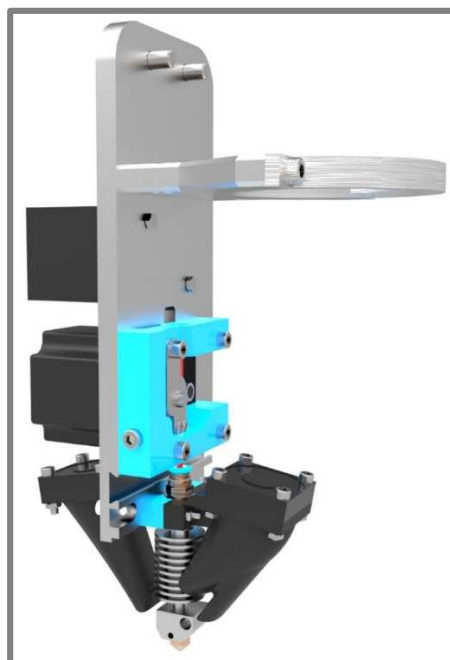
Obr. 2-17: Zařízení na ZHAW [23]

Orientace stolu je určena pomocí tří ramen, která jsou upevněna na samostatně ovládaných hřídelích [25]. Natočením hřídelí je dosaženo změny výšky koncových bodů příslušných ramen, díky čemuž dojde k naklonění stolu. Úhel naklonění stolu vůči tiskové hlavě je limitován kuželovou obálkou okolo tiskové hlavy (příklad kuželové obálky viz Obr. 2-19) a maximálním zdvihem ramen stolu.

Materiál je nanášen ve směru osy Z (vůči souřadnému systému zařízení) a vždy je podepřen již nanesenou částí modelu nebo podložkou. Nedochozí tak k zborcení materiálu vlivem gravitačního působení. Zařízení však nedokáže koordinovat ovládání tiskové hlavy a naklápění stolu [23]. Nanášení materiálu může být tedy spuštěno až po ustavení polohy stolu. Při tisku extrémních převisů se zakřiveným průběhem tak nelze kopírovat ideální trajektorii pro zajištění hladké plochy.

### 2.3 Experimentální zařízení robotického 3D tisku

Pro výzkum a vývoj bezpodporového 3D tisku pomocí robotického ramene slouží na Ústavu Konstruování speciální tisková hlava umístěná na robotickém rameni KUKA KR 60 HA. Nanášení materiálu probíhá vrstvu po vrstvě tak, jako je tomu u standardních 3D tiskáren. Na rozdíl od klasického konceptu je ale podložka, na kterou je nanášen materiál nehybná a všechny pohyby vykonává robotické rameno. Díky 6 stupňům volnosti robotického ramene je navíc umožněno natočení tiskové hlavy (Obr. 2-18), čímž je docíleno nanášení materiálu vůči podložce pod úhlem. Poslední etapa vývoje zařízení byla uskutečněna v rámci studentského projektu ZKR [27] v roce 2016.



Obr. 2-18: CAD model tiskové hlavy z projektu ZKR 2016 [27]

### 2.3.1 Konstrukční řešení

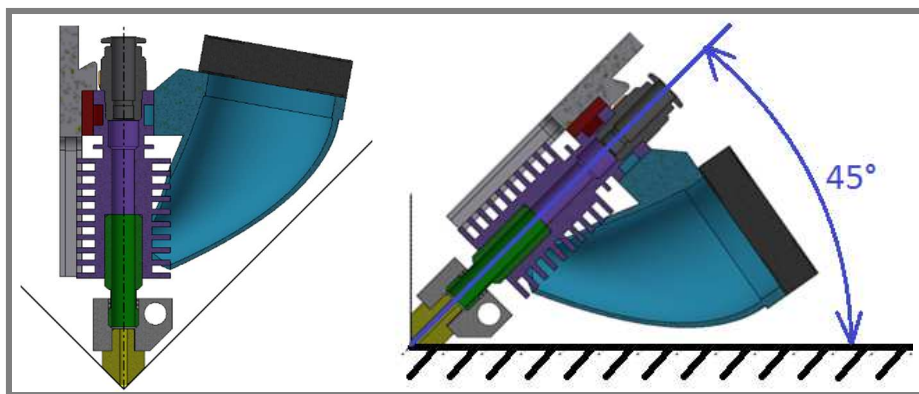
Speciální 3D tisková hlava (Obr. 2-18) je připevněna k vřetenu PDS DLC 90 užívaného k robotickému obrábění. Na horní části vřetene je umístěna konstrukce pro uložení cívky s filamentem. Filament je veden do trysky pomocí krokového motoru SX23-1414. Přítlak filamentu k výstupní hřídeli krokového motoru s globoidním ozubeným kolem je řešen přes šroub, který vymezuje polohu valivého ložiska unášející filament.

Pod krokovým motorem leží pasivní chladič, který slouží jako tepelná clona mezi tryskou a ostatními komponenty tiskové hlavy. Chlazení této součásti probíhá pasivně (díky žebrům se zvyšuje povrch, ze kterého odchází teplo) a také aktivně (k pasivnímu chladiči je veden přívod vzduchu z ventilátoru).

Na pasivní chladič je napojen *heatblok*, do kterého je umístěna topná patrona se vstupním napětím 12 V a příkonem 30 W. Přes závit M8 je poté přišroubována standardní tryska, která byla provrtána na 2 mm pro zvětšení průřezu, kterým je materiál vytlačován. Pro chlazení součásti a pasivního chladiče jsou navrženy 2 ventilátory, ze kterých je vzduch pomocí tubusů, vyrobených metodou FFF, veden do místa tisku a na pasivní chladič.

Obálkový kužel, který určuje minimální možný úhel naklonění tiskové hlavy vůči podložce je zde navržen na 90 ° (viz Obr. 2-19a). Díky tomu lze docílit náklonu hlavy s maximálním úhlem 45 ° (Obr. 2-19b). Při této hodnotě je zaručeno, že nedojde ke kolizi mezi komponenty tiskové hlavy a podložkou.

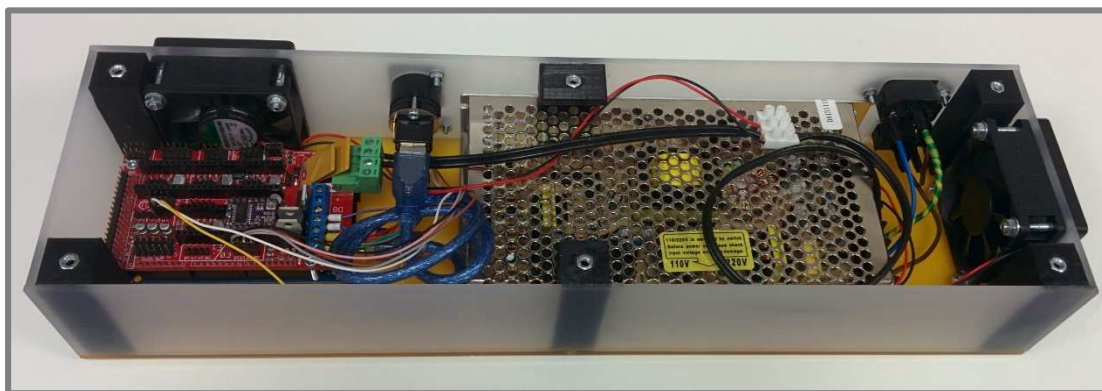




Obr. 2-19: Obálkový kužel (a), nakloněná hlava vůči podložce (b) [27]

### 2.3.2 Ovládání tiskové hlavy

Ovládání tiskové hlavy je realizováno pomocí platformy Arduino MEGA 2560 a její silové nástavby Ramps 1.4. K desce Arduino je připojen displej Nextion NX4024T032\_011R, který umožňuje řízení otáček krokového motoru, ohřevu topného tělesa a ovládání systému chlazení. Všechny analogové a digitální vstupy jsou vedeny do 15pinnového CANON 15V 3R konektoru, ze které jsou pomocí 1 kabelu přenášeny informace do tiskové hlavy [27]. Napájení součástek je zajištěno spínaným zdrojem 12V/120W. Všechny komponenty jsou umístěny v ovládacím boxu (Obr. 2-20).



Obr. 2-20: Elektronika k ovládání tiskové hlavy [27]

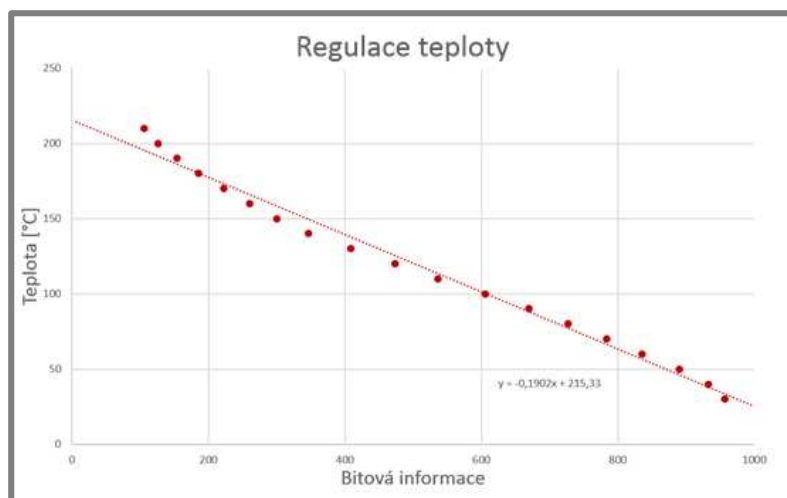
K řízení krokového motoru je v obvodu zapojen driver DM542A (parametry driveru – viz Tab. 2-3)

Tab. 2-3: Parametry driveru krokového motoru DM542A [27]

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	18 – 50 V DC
Vstupní proud	< 4 A
Výstupní proud	1,2 – 4,2 A
Výkon	80 W

Regulace teploty je řešena umístěním termistoru NTC 3950 100K do *heatbloku*, který odesílá bitovou informaci do microcontrolleru Arduino. Součástí softwarového řešení je přepočítání bitové informace na teplotu pomocí lineární interpolace z experimentu pro určení závislosti

mezi bitovou informací a naměřenou teplotou v *heatbloku*. Graf této interpolace je zobrazen na Obr. 2-21

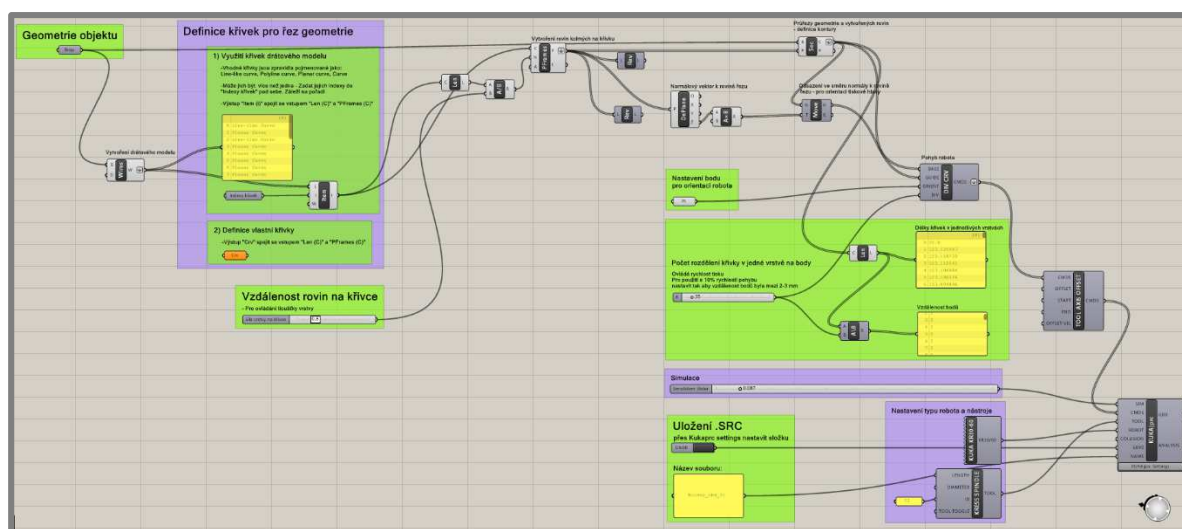


Obr. 2-21: Převod bitové informace z termistoru na hodnotu teploty [27]

Chlazení prostřednictvím ventilátorů o rozměru 40x40x10 mm s výkonem 1,2 W neumožňuje regulaci průtoku vzduchu, jelikož je softwarově řešeno pouze na stavy ZAPNUTO nebo VYPNUTO. Maximální průtok vzduchu chladičem je 4,2 CFM (Cubic feet per minute), což odpovídá přibližně  $2 \text{ l s}^{-1}$ .

### 2.3.3 Ovládání robotického ramene

Pohyb robotické ramene je řízen SRC kódem. Ten je generován ze softwaru *Grasshopper* pomocí pluginu *KUKA/prc*. Prvním krokem při tvorbě trajektorie je import CAD modelu do programu *Rhinoceros*. Model je následně rozdělen na jednotlivé vrstvy. Z vrstev jsou tvořeny množiny bodů ležící v dané vrstvě. Volbou hustoty bodů lze regulovat výpočtovou náročnost procesu. Snížení počtu bodů trajektorie se však výrazně podepisuje na přesnosti tisku. Poté dojde k propojení jednotlivých bodů ve vrstvě tak, aby byl pokryt kompletní sektor, ve kterém má být nanášen materiál. Z těchto křivek je poté vygenerován pomocí pluginu *KUKA/prc* SRC kód.



Obr. 2-22: Skript pro generování trajektorie [27]

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

#### 3.1 Analýza problému

Výzkum bezpodporového 3D tisku je realizován na robotickém rameni KUKA KR60 HA se speciální tiskovou hlavou vyvinutou během studentských projektů. Současné hardwarové a softwarové řešení zařízení výrazně omezuje výhody robotického ramene pro aplikaci 3D tisku.

##### 3.1.1 Nedostatky experimentálního zařízení

Nedostatkem zařízení je absence možnosti přerušovaného 3D tisku. To je zapříčiněno samostatným ovládáním robotického ramene a extruderu. Jelikož tyto dva řídicí prvky spolu nekomunikují, nelze zajistit kooperaci obou částí při přerušení tisku. Trajektorie robotického ramene musí být tedy jedna spojitá křivka. Taktéž v zařízení chybí kvalitní slicer. Nekvalitní trajektorie se výrazně podepisuje na kvalitě tisku.

Kalibrace nástroje na probíhá na robotickém rameni pomocí nájezdu koncového bodu nástroje na referenční bod pod 4 různými úhly (tzv. kalibrace čtyřbodu). Průsečíkem 4 povrchů koulí vzniká v prostoru bod, proto je nutné provést nájezd. Tímto principem je vyhodnocena vzájemná poloha koncového bodu robotického ramene a koncového bodu tiskové hlavy. Ve stávajícím řešení však probíhá nájezd čtyřbodu za pomoci trysky. Nástroj se tedy kalibruje nájezdem plochy o průměru 2 mm vůči referenčnímu bodu. Z toho vyplývá vzniklá nepřesnost kalibrace. Při nanášení materiálu ve tvaru zakřiveného válce dochází k nerovnoměrnému pohybu koncového bodu tiskové hlavy. V místě přechodu mezi vrstvami dochází ke zpomalení nástroje a jeho rotaci okolo osy Z. Tento problém způsobuje nanesení většího množství materiálu v daném místě a tím pádem vznik švu. Popsané tiskové vady jsou zobrazeny na Obr. 2-23



Obr. 3-1: Tiskové vady z řešení projektu ZKR 2016 [27]

Absence regulace průtoku vzduchu způsobuje omezení rozsahu tiskových rychlostí. Pro vyšší rychlosti tisku je nutné zvýšit otáčky krokového motoru vedoucí filament do trysky. Limitujícím faktorem je výkon topné patrony, která dodává teplo do *heatbloku*. Pro zvýšení tiskových rychlostí je nutné zavést regulaci průtoku vzduchu, který sníží ochlazování pasivního chladiče na takovou hodnotu, při které se materiál zahřívá tak, aby nedošlo k jeho roztavení a ulpívání na stěnách chladiče.

Při určitých tiskových strategiích je nutné vypnout přívod vzduchu do místa tisku. Toho nelze u aktuálního řešení dosáhnout, jelikož je chlazení tištěné součásti realizováno stejnými ventilátory jako chlazení pasivního chladiče.

Softwarové řešení pro generování trajektorie je zaměřeno na tisk zakřivených tubusů s možným náklonem tiskové hlavy v závislosti na rovině aktuálního průřezu. Skript však

neumožňuje regulaci maximálního náklonu tiskové hlavy, takže je nutné před spuštěním tisku provést kontrolu trajektorie, zda nedojde při tisku pod úhlem větším než  $45^\circ$  ke kolizi mezi nástrojem a podložkou.

### 3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

V kapitole 2.1 je popsán teoretický princip metody FFF. Tvorba trajektorie při kontinuálním nanášení materiálu závislá především na typu topologie tělesa. Od této vlastnosti se odvíjí způsob generování trajektorie.

Materiálové charakteristiky nejpoužívanějších materiálů popisují vhodnost užití daného materiálu pro aplikaci robotického 3D tisku. Klíčovým parametrem je smrštivost, jelikož dochází vlivem nezahřáté podložky v rychlém poklesu teploty. Teplota skelného přechodu má zásadní vliv na typ spoje mezi nanesenými vlákny. Při tvorbě spoje nad teplotou skelného přechodu dochází k difúzi mezi vlákny. Pod touto teplotou dochází ke studenému spoji, kde soudržnost zajišťuje adhezní síla. Pro kvalitní prostorové nanášení materiálu, kde není poskytnuta podpora formou již vytvořeného tělesa, je vhodné volit materiál s optimální hodnotou indexu tekutosti taveniny (MFI). Při nižší hodnotě MFI dochází ke komplikovanějšímu zpracování materiálu vlivem vyššího tření. Pro extruzi je tak potřeba vyšších hnacích sil. Naopak u materiálů s příliš vysokou hodnotou MFI dochází k pohybu částic ve všech směrech a tím pádem ke snížení přesnosti tištěné součástí a soudržnosti vláken. Cílem je tedy najít optimální kombinaci hodnoty MFI s provozní teplotou trysky.

Robotická zařízení ve světě se zaměřují na tvorbu velkorozměrových dílů. Většina zařízení využívá tisku prutových konstrukcí, kde u těles dochází ke značné úspoře materiálu a času výroby. Tato tělesa jsou vhodná jako prototypy a propagační předměty, které nejsou mechanicky zatěžovány, nebo je u těchto těles kladen důraz na nízkou hmotnost. Tiskové hlavy jsou většinou vybaveny speciální tryskou v kombinaci s *heatblokem* a topnou patronou. Chlazení bývá realizováno nejčastěji pomocí ventilátorů nebo stlačeného vzduchu, kde je možné snadno regulovat množství vzduchu dodávaného do místa tisku.

Zařízení na Ústavu konstruování disponuje speciální tiskovou hlavou. Hlavním problémem konstrukčního řešení je kalibrace tiskové hlavy na robotickém rameni. Konstrukce tiskové hlavy umožňuje maximální náklon vůči podložce pod úhlem  $45^\circ$ . Tato hodnota je dána obálkovým kuzelem od hrotu trysky. Chlazení je realizováno pomocí ventilátorů, které nejsou softwarově řešeny pro regulaci průtoku vzduchu.

Skript pro generování trajektorie slouží pro tvorbu zakřivených tubusů. Tisk probíhá s náklonem tiskové hlavy kolmo k aktuálnímu průřezu vytištěného tělesa. Během tisku dochází k nerovnoměrnosti pohybu koncového bodu trysky, což má za následek nerovnoměrnou extruzi a vznik švu.

### 3.2 Podstata a cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout tiskové strategie bezpodprového 3D tisku, provést konstrukční úpravy stávajícího řešení tiskové hlavy a vytvořit skripty pro realizování experimentů pomocí robotického ramene KUKA KR60 HA.

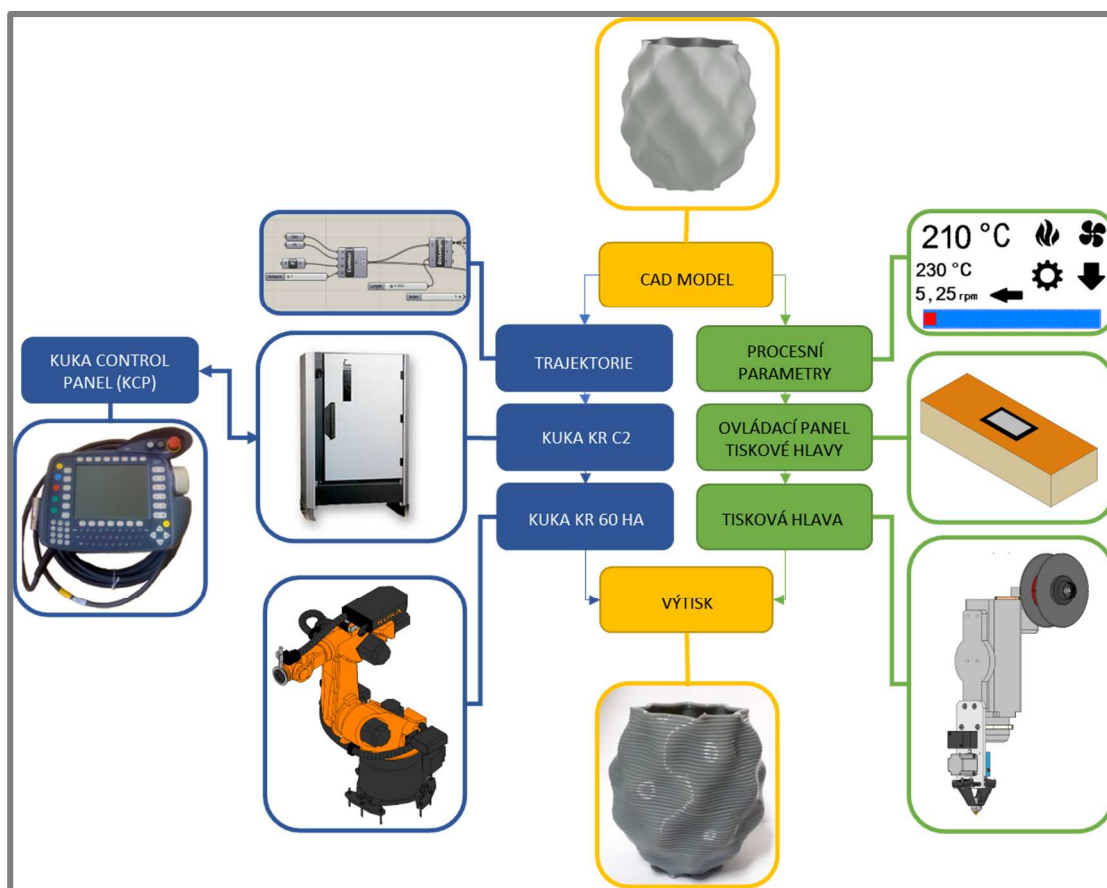
Dílními cíli práce jsou:

- Identifikace možných konstrukčních úprav pro 3D tisk s náklonem tiskové hlavy minimálně  $50^\circ$
- Návrh a realizace trysky, kalibračního prvku a systému chlazení tiskové hlavy
- Návrh testovacích objektů pro realizaci experimentů
- Provedení optimalizace procesních parametrů
- Realizace experimentálního 3D tisku na robotickém rameni KUKA KR60 HA



## 4 MATERIÁL A METODY

Vývoj technologie bezpodporového a velkorozměrného 3D tisku je realizován na robotickém ramene KR 60 HA od společnosti KUKA. Jako nástroj zde slouží tisková hlava vyvinutá během předešlých studentských projektů. Ovládání extruze materiálu je docíleno pomocí samostatného ovládacího boxu. Trajektorie robotického ramene je zajištěna SRC kódem, který je generován algoritmem vytvořeným v prostředí softwaru Grasshopper. Schéma kompletního zařízení je zobrazeno na Obr. 4-1



Obr. 4-1: Schéma zařízení robotického 3D tisku

### 4.1 Návrh tiskových strategií

Pro experimentální ověření schopnosti tisku převyšlých objemů pomocí robotického ramene a speciální tiskové hlavy, je nutné navrhnout různé tiskové strategie, na kterých je metoda testována. Pro realizaci experimentu je nutné určit 4 parametry:

- Přerušovaný/Kontinuální tisk
- Fixní hlava/Fixní stůl
- Tisk s náklonem/bez náklonu tiskové hlavy
- Rovina podložky

Podle těchto parametrů je poté specifikován způsob nanášení materiálu, procesní parametry 3D tisku a tvorba trajektorie.

### 4.1.1 Přerušovaný/Kontinuální tisk

Jelikož řízení robotického ramene a krokového motoru extruderu probíhá nezávisle na sobě, je komplikované v aktuálním stavu provádět přerušovaný 3D tisk. Jako řešení se nabízí dva možné přístupy. Prvním je zajištění komunikace řídicí jednotky robotického ramene KR C2 s microcontrollerem Arduino ovládající extruder přes třetí zařízení (např. notebook s vhodným softwarem – MATLAB). Druhou cestou je tvorba speciálního slicovacího skriptu, který zajistí vhodnou trajektorii pro tisk bez přerušování dodávky materiálu. Těleso tak bude vytvořeno pomocí jedné spojitě křivky.

Přístup zajištění komunikace mezi dvěma nezávislými jednotkami byl neúspěšně testován během předchozího projektu. Jelikož tento krok s sebou nese rizika možného poškození řídicí jednotky robotického ramene, bylo od této cesty ukročeno.

Práce se tedy ubírá cestou tvorby programu pro zajištění nepřetržitého nanášení materiálu po specifické trajektorii – spirále na povrchu tělesa.

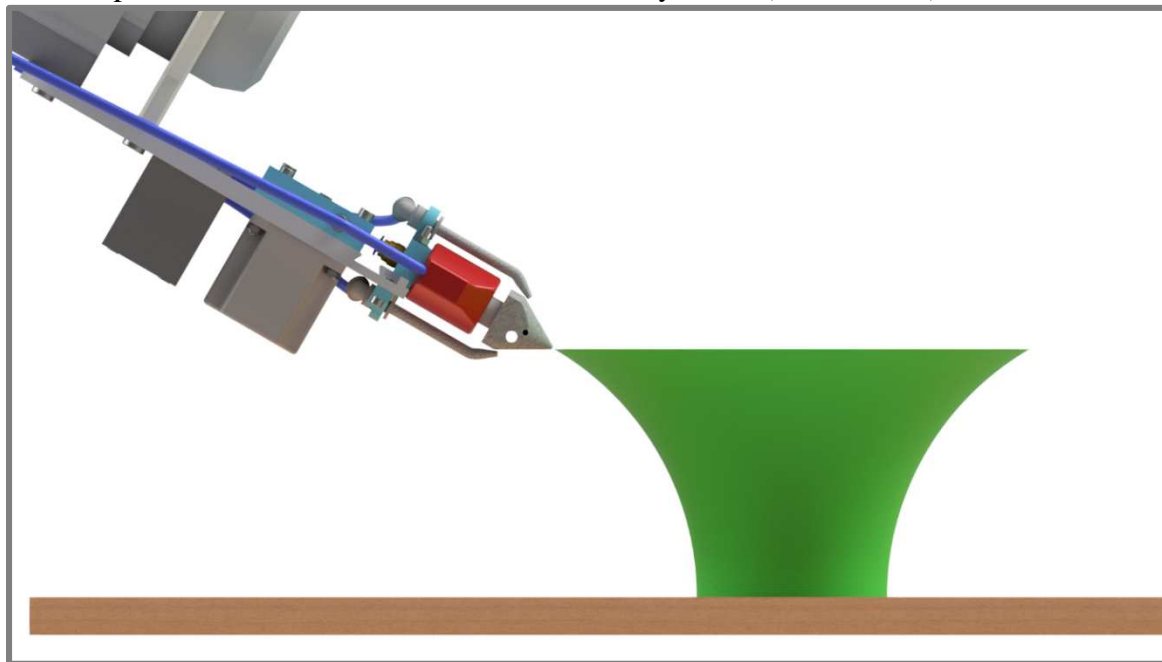
### 4.1.2 Fixní hlava/Fixní stůl

V kapitole 2.2 jsou popsány dva možné přístupy z hlediska kinematiky stroje – zařízení s fixní stolem nebo fixní tiskovou hlavou. Experimentální zařízení na Ústavu Konstruování funguje na principu s fixním stolem, kde všechny potřebné pohyby pro nanášení materiálu jsou konány pomocí robotického ramene, na kterém je fixně připevněna tisková hlava.

Vývoj technologie 3D tisku pomocí robotického ramene směřován především na realizaci velkorozměrných dílů. Varianta s fixním stolem je tedy nežádoucí z důvodu výrazného omezení pracovního prostoru.

### 4.1.3 Náklon tiskové hlavy

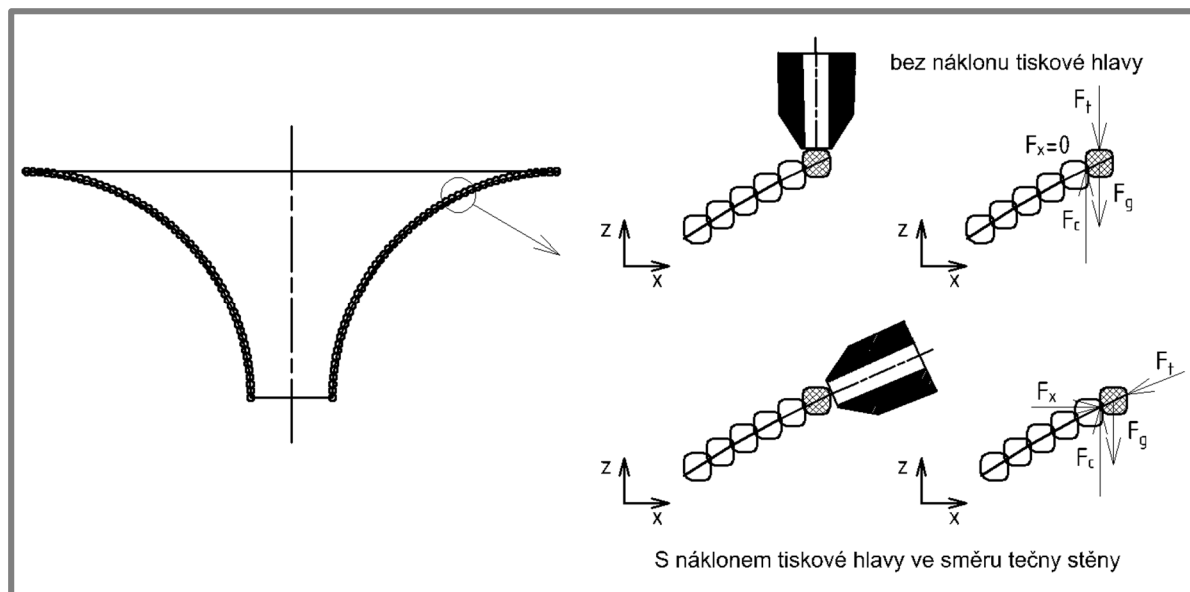
Díky 6 stupňům volnosti soustavy lze docílit náklonu tiskové hlavy vůči vytištěné součásti. Takto lze provádět nanášení materiálu ve směru stěny tělesa (viz Obr. 4-2).



Obr. 4-2: Náklon tiskové hlavy

Náklonem tiskové hlavy je dosaženo změny směru silového působení do již vytištěného tělesa. Tím je zajištěna kvalitnější soudržnost vrstev, protože je potřeba nižších adhezních sil. Při tisku pod úhlem je totiž síla od nástroje rozložena do vertikálního směru, ve kterém působí

gravitace a směru horizontálního, který pokrývá vytištěné těleso. Silové působení je zobrazeno na řezu tělesem v Obr. 4-3.



Obr. 4-3: Silové působení při nanášení převislého objemu

Pro zobrazenou hypotézu platí silová rovnováha v ose Z:

$$\text{bez náklonu: } F_c = F_g + F_t$$

$$\text{s náklonem: } F_c = F_g + F_t \cdot \sin(\alpha)$$

kde:

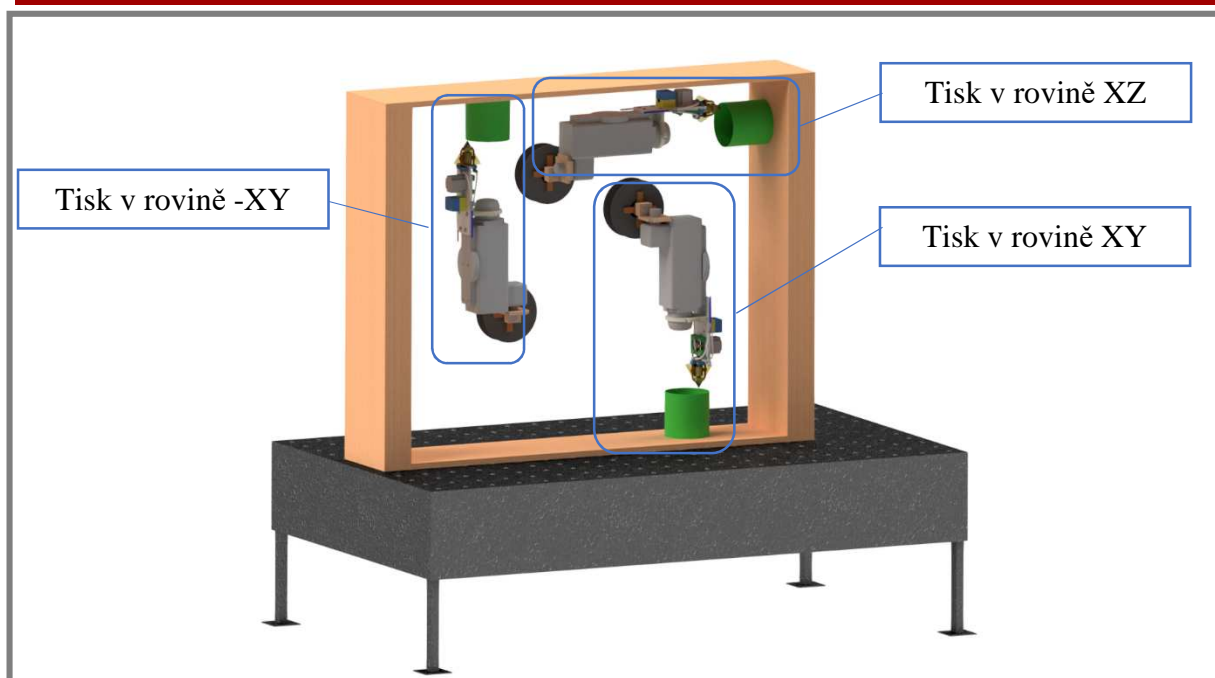
$F_c$	N	- potřebná síla v kontaktu pro zajištění soudržnosti vláken
$F_g$	N	- tíhová síla působící na nanášené vlákno
$\alpha$	°	- úhel převisu vůči rovině podložky

Z obou vztahů vyplývá, že potřebná síla v kontaktu  $F_c$  se zmenšuje se snižováním úhlu nanášení materiálu vůči podložce.

#### 4.1.4 Volba roviny podložky

Stejně jako u klasického konceptu 3D tiskáren je realizován robotický 3D tisk na podložku ležící v rovině XY. Nanášení materiálu probíhá pomocí tiskové hlavy ve směru záporné osy Z. Při tisku je využíváno nanášení materiálu na již vytvořené těleso.

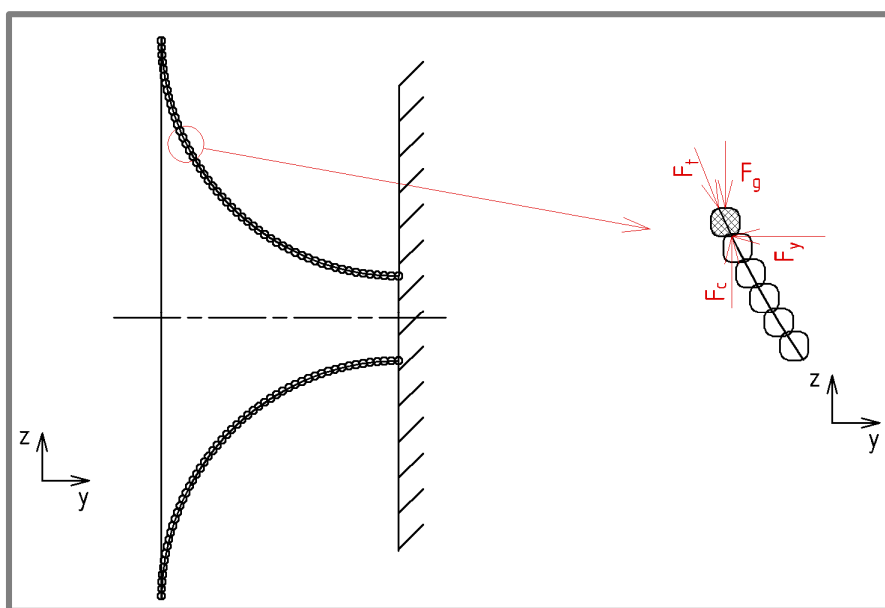
U nanášení převislého objemu je klíčovým parametrem adheze mezi vlákny a silové působení od nástroje. Pro zkoumání kvality adheze vláken jsou navrženy experimenty, při kterých probíhá tisk na podložku ležící v rovině XZ, respektive v rovině XY s převráceným normálovým vektorem osy Z (tzn. tisk na stropní stěnu). Zde je jedinou silou, která zajišťuje soudržnost vláken, právě síla adhezní. Tyto popsání přístupy jsou zobrazeny na Obr. 4-4



Obr. 4-4: Různé roviny podložky

#### Tisk na podložku v rovině XZ

Soudržnost tištěného tělesa zajišťuje při tisku v rovině XZ především kontaktní síla mezi jednotlivými vlákny. Na Obr. 4-5 je zobrazen silový rozbor této situace. Polohu tělesa na podložce zajišťuje adheze první vrstvy naneseného materiálu s podložkou.



Obr. 4-5: Silový rozbor – tisk v rovině XZ

Pro zobrazenou hypotézu platí silová rovnováha v ose Z:

$$F_c = F_g + F_t \cdot \sin(\alpha)$$

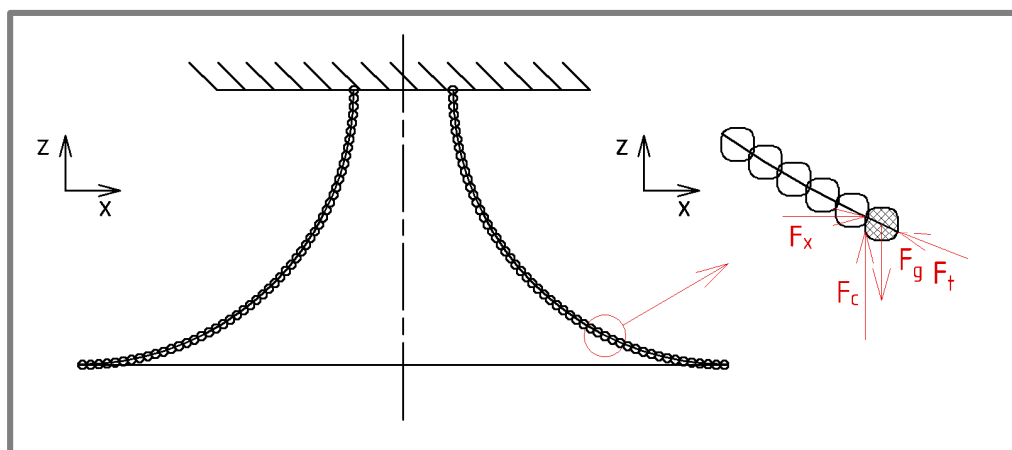
kde:

$F_c$	N	- potřebná síla v kontaktu pro zajištění soudržnosti vláken
$F_g$	N	- tíhová síla působící na nanášené vlákno
$\alpha$	°	- úhel převisu vůči rovině podložky

Tisk na podložku v rovině XY s obráceným normálovým vektorem

V případě tisku na stropní stěnu (tj. rovina -XY) je klíčovým kritériem adheze první nanášené vrstvy k podložce. Tíhová síla působící ve směru normály podložky způsobuje při nedostatečné adhezi odtržení tělesa od podložky a tím pádem neúspěšné ukončení procesu tisku.

Oproti předchozím situacím dochází k náklonu tiskové hlavy vůči normále pracovního stolu o úhel větší než  $90^\circ$ , což má za následek, že tíhová síla se nepodílí na nanášení materiálu do požadovaného místa. Jedinou silou, zajišťující soudržnost vrstev, je tedy vytlačovací síla od nástroje (viz Obr. 4-6). Pro tisk na stropní podložku je tedy nutné navolit vyšší hodnotu otáček krokového motoru.



Obr. 4-6: Silový rozbor – tisk v rovině -XY

Pro zobrazenou hypotézu platí silová rovnováha v ose Z:

$$F_c = F_g - F_t \cdot \sin(\alpha)$$

$F_c$	N	- potřebná síla v kontaktu pro zajištění soudržnosti vláken
$F_g$	N	- tíhová síla působící na nanášené vlákno
$\alpha$	°	- úhel převisu vůči rovině podložky

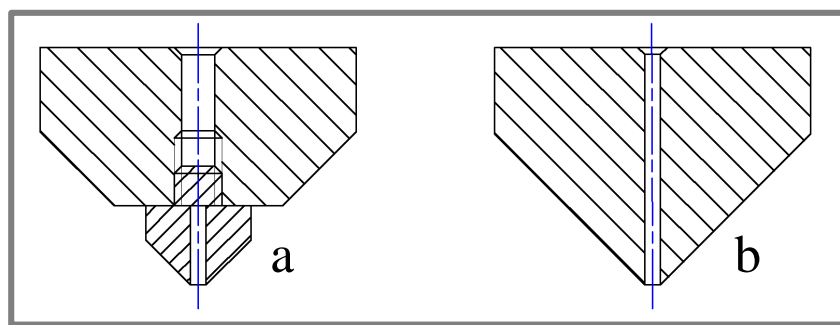
## 4.2 Konstrukční úpravy tiskové hlavy

Hlavním přínosem konstrukčních úprav tiskové hlavy je zajištění kvalitnější kalibrace zařízení, dosažení většího úhlu náklonu nástroje, možnost regulace průtoku vzduchu pro chlazení pasivního chladiče a vytištěné součásti.

### 4.2.1 Tryska

Pro zajištění možnosti většího náklonu tiskové hlavy vůči podložce je nutné snížit hodnotu vrcholového úhlu obálového kužele, který vymezuje maximální náklon tiskové hlavy, při kterém nedojde ke kolizi s vytištěným materiálem nebo podložkou.

Trysku lze realizovat dvěma způsoby – jako samostatná tělesa *heatbloku* a trysky (Obr. 4-7a) nebo jako jednu spojenou součást (Obr. 4-7b)



Obr. 4-7: Koncept samostatných (a) a spojených (b) těles trysky a heatbloku

#### Samostatná tělesa *heabloku* a trysky

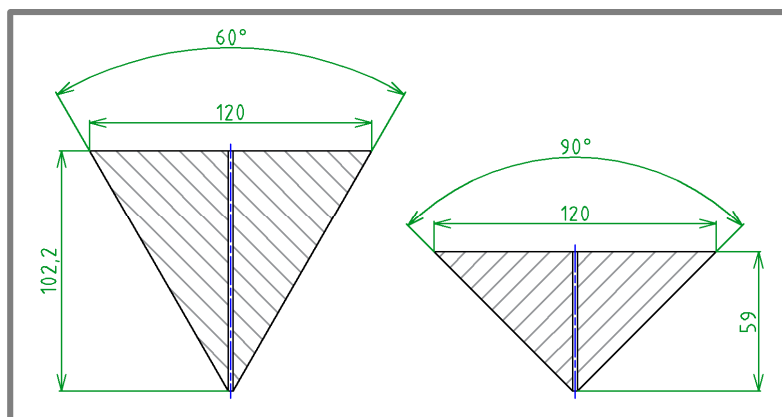
Tento způsob je vhodný pro zařízení, kde není potřeba dosáhnout nízkého vrcholového úhlu obálkového kužele. Zařízení lze konstruovat tak, že je užito trysky s menšími rozměry, na které je poté připevněn *heatblok*, jehož rozměry limituje velikost topného tělesa. Výhodou tohoto řešení je možnost užití rozdílných materiálů trysky a *heatbloku*, což se projeví nejen na tepelných vlastnostech, ale také na způsobu výroby, a tedy i ceně.

Spoj těchto částí je nejčastěji realizován pomocí závitu. Při užití rozdílných materiálů je třeba uvažovat různé součinitele tepelné roztažnosti, což může způsobit deformaci spojovacího závitu. Poté hrozí poškození součástí při manipulaci.

#### Spojené těleso *heatbloku* a trysky

Koncept je vhodný pro zajištění menších vrcholových úhlů obálkového kužele. Tento koncept je výhodný pro zařízení, kdy je nutné zajistit náklon tiskové hlavy vůči podložce, případně podložku vůči tiskové hlavě.

Problematické se při požadavku nízkého úhlu obálkového kužele jeví umístění topné patrony. Při takto nízkém úhlu (např.  $60^\circ$  –  $70^\circ$ ) dochází k výraznému zvýšení poměru výšky a šířky součástí (viz Obr. 4-8).

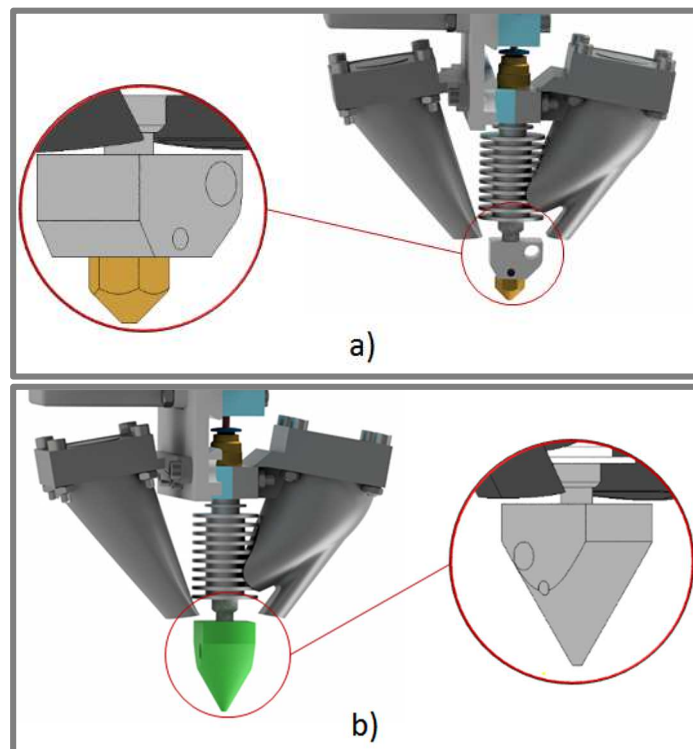


Obr. 4-8: Závislost výšky trysky na úhlu špičky

Častým ohřevem *heatbloku* a trysky dochází u rozdílných materiálů (*heatblok* – dural, tryska – mosaz) vlivem odlišných koeficientů tepelné roztažnosti k deformaci závitu. Při demontáži došlo z tohoto důvodu k poničení závitu na válcové ploše trysky.

Z těchto důvodů bylo přikročeno k úpravě stávajícího zařízení (Obr. 4-9a). Aby se předešlo problémům s ustavením trysky v *heatbloku*, bylo rozhodnuto k realizaci těchto komponent jako jednoho kusu (Obr. 4-9b). Pro zajištění většího úhlu převisu byl zmenšen úhel špičky z  $90^\circ$  na  $60^\circ$ , díky čemuž je možné nyní realizovat tisk s náklonem  $60^\circ$  vůči podložce.

Pro upevnění nové trysky s *heatblokem* musel projít konstrukčními změnami taktéž nástavec mezi *heatblokem* a pasivním chladičem. Byla zesílena tloušťka stěny, díky čemuž je zajištěno kvalitnější oddělení tepelného toku od pasivního chladiče. K tomu bylo nutné přistoupit taktéž z důvodu, že tloušťka stěny v místě výběhu závitu byla pouze 0,5 mm a hrozilo tak poškození nástavce při manipulaci se zařízením.



Obr. 4-9: Původní (a) a nová (b) konstrukce trysky s *heatblokem*

V Tab. 4-1. je provedeno porovnání původní a nové konstrukce trysky s *heatblokem* z hlediska geometrických a termodynamických vlastností. V Tab. 4-1 je tryska s *heatblokem* popisována sjednoceným termínem *tryska*.

Tab. 4-1: Porovnání vlastností konstrukcí trysky s *heatblokem*

Vlastnost	Původní konstrukce	Nová konstrukce
Vrcholový úhel obálky <sup>1</sup>	90° (96°)	60° (66°)
Maximální výška trysky [mm]	23	34
Maximální šířka trysky [mm]	20	32
Výška osy topné patrony [mm]	19	21,5
Vzdálenost patrony od těžiště [mm]	9,5	6,1
Tepelná kapacita [J K <sup>-1</sup> ]	12,46	25,76
Objem materiálu [mm <sup>3</sup> ]	4693,7	10367,5

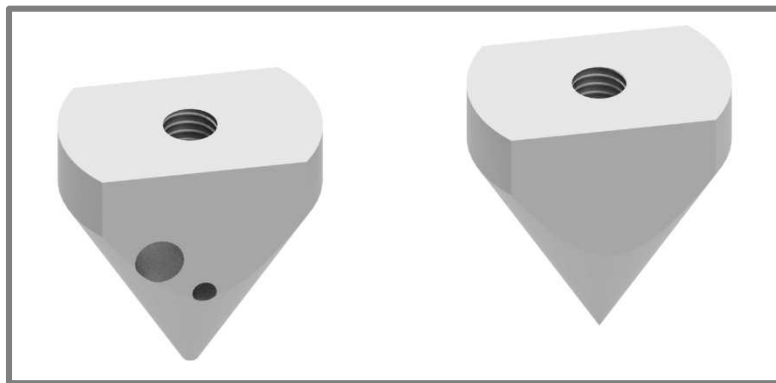
V trysce je vyvrtána průchozí díra o průměru 6 mm pro uložení topné patrony a díra o průměru 3 mm s hloubkou 6 mm pro uložení termistoru.

<sup>1</sup> První hodnota popisuje vrcholový úhel obálky trysky, druhá hodnota započítává i zařízení sloužící pro chlazení materiálu (cca +3 ° na obou stranách tělesa → +6 °)



### 4.2.2 Nástavec pro kalibraci

Současně s tryskou byl vyroben také speciální nástavec určený ke kalibraci zařízení pomocí čtyřbodové metody. Tvar nástavce kopíruje tvar navržené trysky, přičemž zde nejsou realizovány otvory pro topnou patronu, termistor a otvor trysky pro vytlačování filamentu (viz Obr. 4-10).



Obr. 4-10: Tryska (vlevo) a kalibrační nástavec (vpravo)

Díky hrotu nástavce je možné uskutečnit kalibraci pomocí metody čtyřbodu s daleko větší přesností, než by tomu bylo u kalibraci pomocí plochy u otvoru trysky. Přesná poloha hrotu, resp. trysky je vymezena distančním prvkem.

### 4.2.3 Systém chlazení

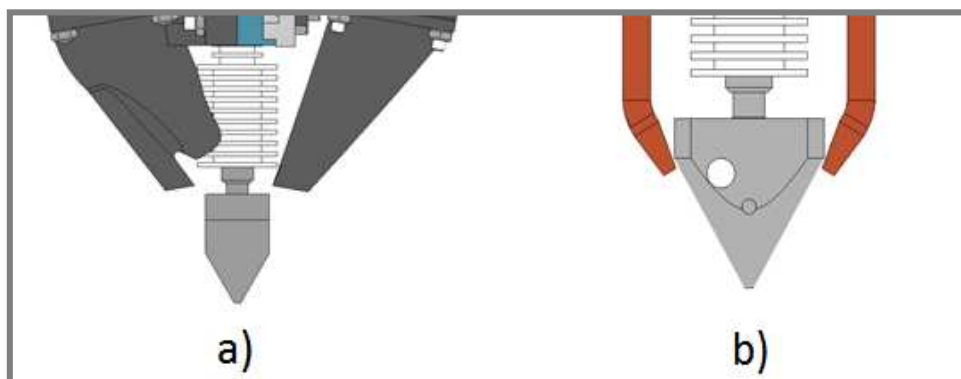
Pro zajištění extruze je nutné vytvořit tepelné clony mezi tryskou, *heatblokem* a ostatními částmi tiskové hlavy. Pokud by nedošlo k zamezení vedení tepla z *heatbloku*, mohlo by dojít k ohřevu filamentu již nad tryskou, což by mohlo způsobit ucpání přívodu materiálu. Proto je nutné vést chlazení k místu, kde se nachází pasivní chladič, který zajišťuje funkci tepelné clony. Chladicí médium zajišťuje udržování teploty přiváděného filamentu pod teplotou skleného přechodu. Pro zajištění optimálních procesních parametrů je proto vhodná regulovatelnost přívodu chladicího média.

V souvislosti se změnou geometrie trysky a *heatbloku* dochází ke zvětšení výšky nástroje. Při užití stávajícího řešení chlazení výrobku by docházelo ke kontaktu proudícího vzduchu s *heatblokem*. Tímto by se *heatblok* chladil a bylo by potřeba dodávat více tepla k jeho zahřátí.

Prvním navrženým řešením je úprava stávajícího řešení chlazení. Užitím stejných ventilátorů lze vytvářet proudící vzduch, který je poté novými tubusy veden do potřebného místa pod tryskou (viz Obr. 4-11a).

Alternativním řešením je využití stlačeného vzduchu, kdy lze využít rozvod vzduchu v laboratoři. Pomocí škrťacího ventilu lze regulovat průtok vzduchu, který je poté veden trubicemi do místa tisku (Obr. 4-11b). Výhodou této varianty je oproti konceptu s ventilátory menší omezení opsaného kuželu, který vytváří tryska. Nedojde tak k příliš velkému snížení hodnoty úhlu, o který lze naklonit tiskovou hlavu vůči podložce.



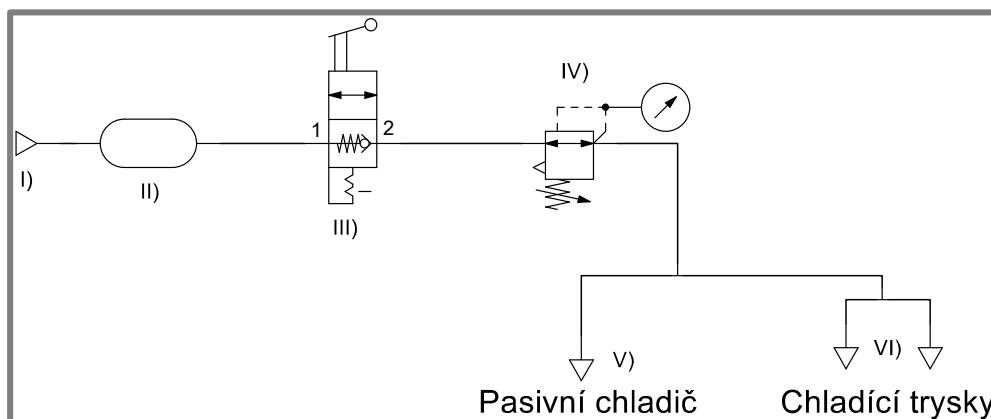


Obr. 4-11: Chlazení ventilátory – původní (a), stlačeným vzduchem (b)

Vzhledem k prioritě minimálního úhlu špičky bylo přikročeno k realizaci chlazení pomocí stlačeného vzduchu. Níže jsou popsány 4 možné pneumatické okruhy zajišťující přívod vzduchu k do potřebných míst. Ve všech variantách je okruh vybaven zdrojem tlakového vzduchu z rozvodu po budově (v následujících Obr. Značeno symbolem I), vzdušníkem o objemu 1000 L (symbol II) a pneumatickou pistolí fungující na principu 2/1 ventilu. (symbol III). Tyto součásti jsou standardním vybavením laboratoře robotického pracoviště.

#### A) REGULACE ŠKRTÍCÍM VENTILEM

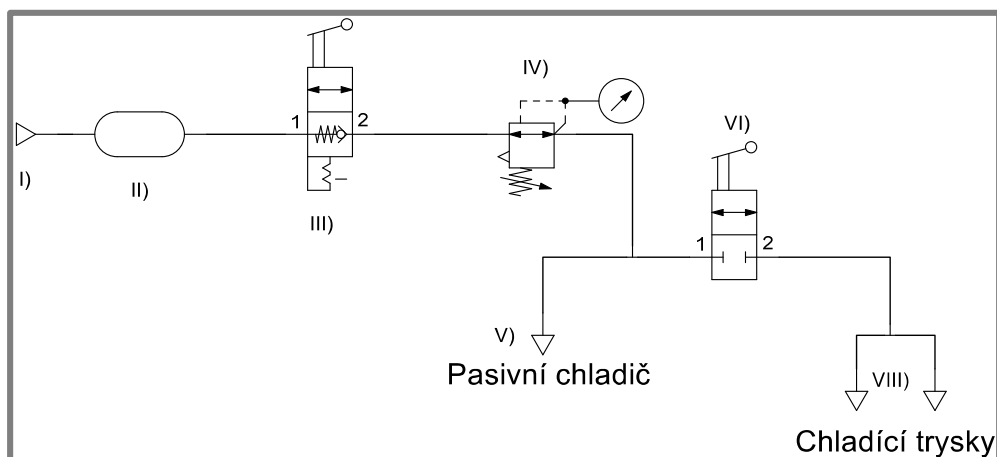
Přívod vzduchu do pasivního chladiče a ofukovacích trysek je regulován pomocí jednoho škrtícího ventilu (symbol IV) – viz Obr. 4-12. Výhodou konceptu je nulová finanční náročnost, jelikož lze sestavit z již dostupných komponent. Nevýhodou je vzájemná závislost průtoku obou chladících okruhů.



Obr. 4-12: Varianta A – regulace 1 škrtícím ventilem

#### B) REGULACE ŠKRTÍCÍM A 2/2 UZAVÍRACÍM VENTILEM

Jedná se o upravenou variantu A, kde dochází k přidání 2/2 uzavíracího ventilu (symbol VI) do větve sloužící k chlazení vytištěné součásti – viz Obr. 4-13. Díky tomu lze tuto větev vypnout bez celkového uzavření přívodu vzduchu. Pasivní chladič tak nadále zůstává chlazen. Nastavením polohy do přechodové fáze mezi otevřením a uzavřením průtoku lze vytvořit překážku, která zvyšuje pneumatické ztráty v okruhu. Díky tomu dojde k poklesu rychlosti na výstupu. Cenová náročnost je opět minimální, je potřeba pouze dvou spojovacích prvků. Uzavírací ventil je pro experimenty k dispozici.

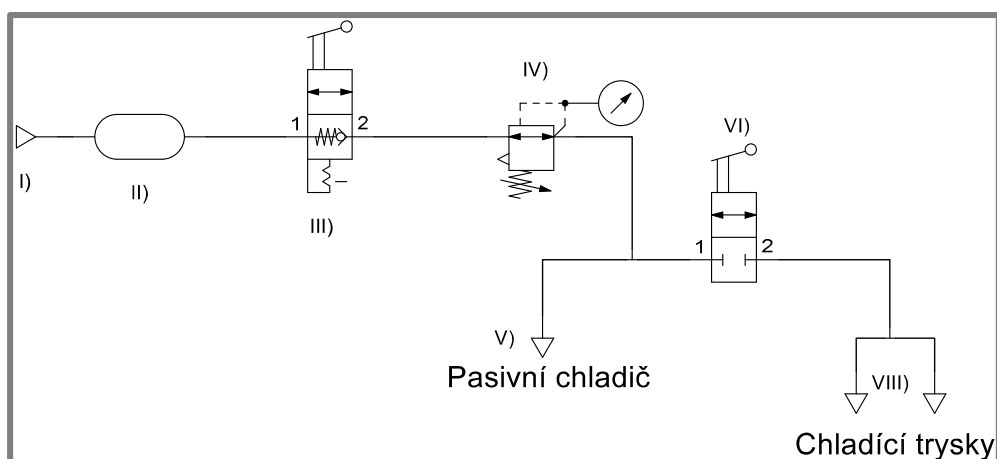


Obr. 4-13: Varianta B – regulace škrtícím a 2/2 ventilem

### C) REGULACE ŠKRTÍCÍM VENTILEM A 3/2 UZAVÍRACÍM VENTILEM

Oproti variantě B je vyměněn 2/2 ventil za 3/2 ventil – viz Obr. 4-14. Ventil má tak jeden vývod navíc oproti předchozí variantě. Ten je zakončen pneumatickým tlumičem pro utlumení hluku při výfuku.

Princip je podobný jako u varianty B. Ventilem je regulován průtok vzduchu směrem k ofukovacím tryskám, tentokrát však vytvořením vedlejšího výfuku. Díky tomuto dochází k poklesu tlaku a tím k snížení rychlosti proudění. Natočení ventilu lze regulovat průřez vedlejšího výfuku a tím také průtok směrem k ofukovacím tryskám. Výhodou systému je nízká finanční náročnost, jelikož lze okruh sestavit z dostupných komponent s výjimkou dvou připojovacích prvků – tak jako v případě varianty B.

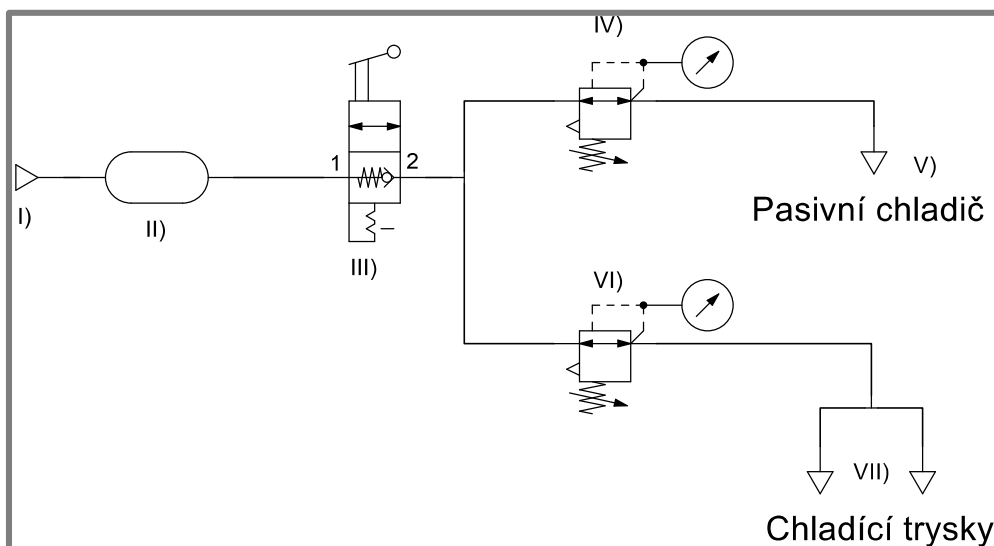


Obr. 4-14: Varianta C – regulace škrtícím a 3/2 ventilem

### D) REGULACE 2 ŠKRTÍCÍMI VENTILY

Poslední varianta (Obr. 4-15) zahrnuje schopnost individuální regulace průtoků vzduchu pro chlazení pasivního chladiče a chladících trysek vedoucích vzduch na vytištěnou součást. Toho je docíleno pomocí dvou škrtících ventilů, které jsou zapojeny ve dvou paralelních větvích. Tím je dosažena absolutní nezávislost průtoků chladících médií v obou větvích.

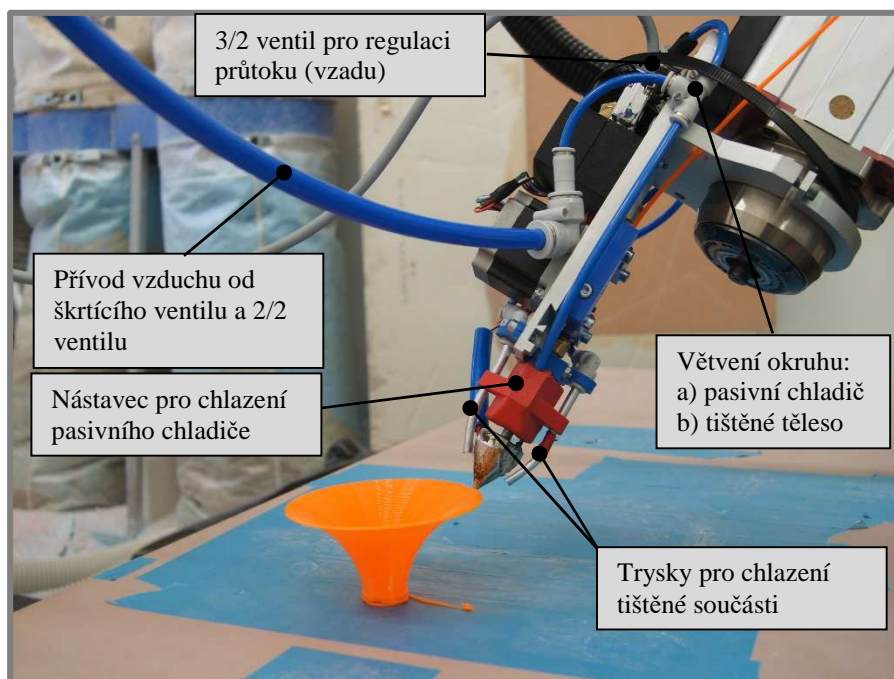
Nevýhodou této konfigurace je nutnost nákupu druhého škrtícího ventilu. Jeho cena pohybuje v rozmezí 1000 – 3000 Kč v závislosti na typu. Současně je nutné uvažovat nárůst celkové délky hadic, jelikož je vhodné umístit tlakové regulátory mimo robotické rameno a umožnit tak obsluhu regulaci tlaku za chodu.



Obr. 4-15: Varianta D – regulace 2 škrtícími ventily

Pro realizaci byla díky nulové cenové náročnosti a dodatečné schopnosti regulace průtoku vzduchu zvolena modifikovaná varianta C – regulace pomocí škrtícího ventilu a 3/2 uzavíracího ventilu. Za pneumatickou pistolí je napojen škrtící ventil 0821302500 od společnosti Aventics s nominálním průtokem  $9500 \text{ l min}^{-1}$  a pracovním tlakem v rozmezí 0,5 – 16 bar. Následuje uzavírací 2/2 ventil pro otevírání nebo uzavírání přívodu vzduchu. Vzduchu je dále veden pomocí 12 mm hadic do spojovacího prvku typu T, odkud je větven na pasivní chladič a ofukovací trysky. U větve na pasivní chladič se nachází 3/2 ventil 0821300903 od společnosti Aventics pro regulaci průtoku vzduchu v této větvi. Na jejím konci je difuzor vyrobený metodou FFF, který zajišťuje chlazení pasivního chladiče po maximální možné ploše.

Větev pro ofukování vytištěného modelu je po oddělení od větve na pasivní chladič dále vedena pomocí 6 mm hadic do spojovacího prvku typu T. Odtud je dělena do dvou hliníkových trysek. Ty jsou k okruhu připojeny přes spojovací prvky typu L. Díky zvolené geometrii dochází k výraznému snížení zástavbového prostoru, což má výhodu především v menším omezení kuželové obálky od hrotu trysky, která určuje maximální bezpečný náklon tiskové hlavy vůči podložce.



Obr. 4-16: Pneumatický systém chlazení tiskové hlavy

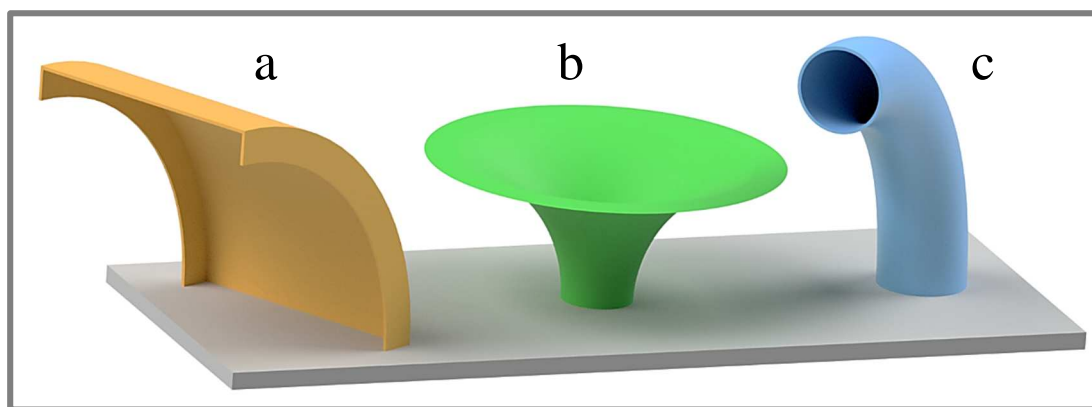
### 4.3 Návrh testovacích objektů

Velký průměr trysky (2 mm) speciální tiskové hlavy umožňuje nanášení většího množství materiálu v porovnání s klasickými 3D tiskárnami. Díky tomu lze dosáhnout tisku skořepinových těles nanášením pouze jedné vrstvy materiálu tvořící stěnu vytištěné součásti.

Pro realizaci bezpodporového tisku je nutné navrhnout speciální tělesa, na kterých bude tvorba převislých objemů otestována. Tvar a rozměr těles je závislý na zvolené metodě nanášení materiálu a trajektorii robotického ramene.

Podle těchto parametrů lze tělesa rozdělit do 3 skupin (viz Obr. 4-17):

- Otevřená stěna
- Spirální váza
- Zakřivený tubus



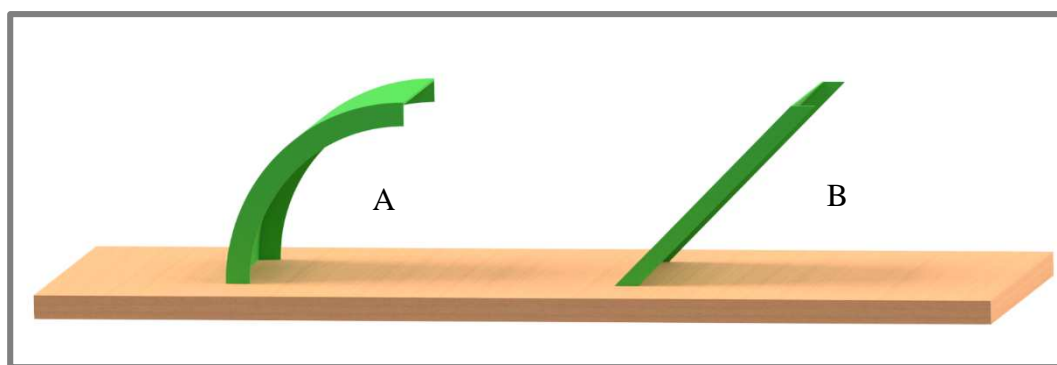
Obr. 4-17: Typy testovacích objektů

#### 4.3.1 Otevřená stěna

Termínem „otevřená stěna“ je pro účely projektu popsáno těleso ohraničené pomocí 1 uzavřené křivky (viz Obr. 4-18). Pro realizaci experimentů byly navrženy 2 možné geometrie otevřené stěny.

První variantou je zakřivená stěna, jejíž úhel náklonu vůči podložce je progresivně rostoucí. Druhá možnost je reprezentována přímou stěnou, která je charakteristická konstantním úhlem náklonu vůči podložce.

Pro testování bezpodporového tisku se jeví jako vhodnější varianta A (Obr. 4-18), kde dochází k postupnému nárůstu úhlu převisu. Díky tomu lze pozorovat, při které hodnotě úhlu převisu dojde k borcení materiálu a vzniku nerovností. Finální úpravou tohoto tělesa je přidání bočních štítů, které zvyšují modul průřezu v ohybu. Díky tomu jsou nanášené vrstvy více stabilní, jelikož nedochází k tak velkému průhybu tělesa oproti variantě bez bočních štítů.

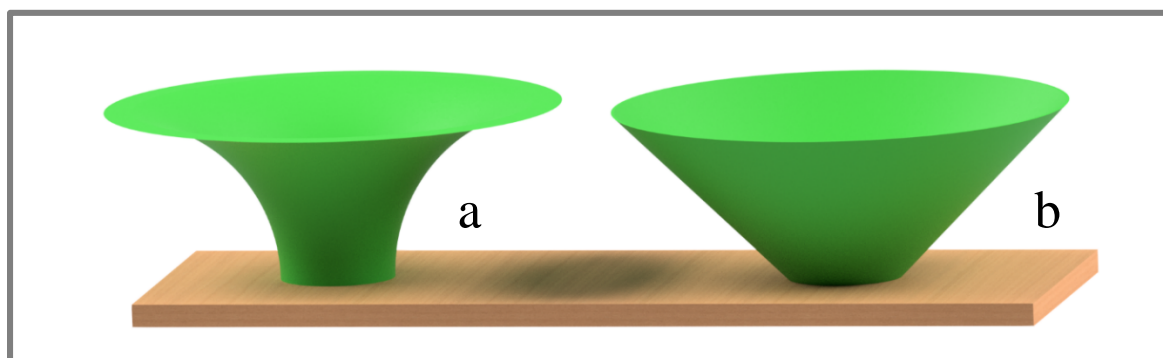


Obr. 4-18: Možné varianty otevřené stěny

### 4.3.2 Spirální váza

Spirální váza je, na rozdíl od otevřené stěny, skořepinové těleso ohraničené pomocí 2 spojitých křivek. Jedná se o takové těleso, které lze ve vhodném směru rozdělit na nekonečné množství rovnoběžných uzavřených křivek.

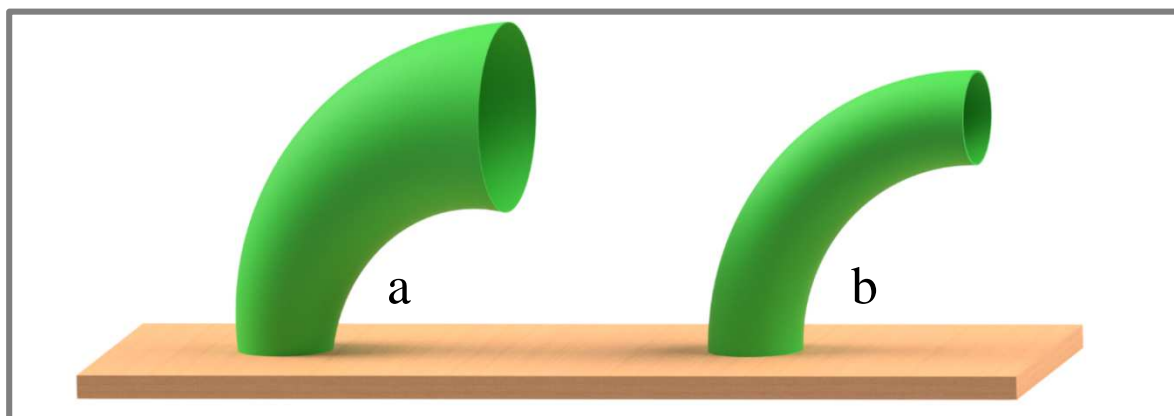
Pro realizaci převislého objemu bylo přistoupeno ke stejnému principu řešení trajektorie jako u otevřené stěny. Skořepinu lze realizovat buď s progresivním nárůstem úhlu převisu s rostoucí výškou nebo jako komolý kužel s konstantním úhlem převisu (viz Obr. 4-19). Pro zajištění identických podmínek ve všech směrech tělesa bylo zvoleno kruhovitěho tvaru tělesa. Díky tomu lze pozorovat možný vliv polohy tiskové hlavy a jejího relativního natočení vůči tělesu.



Obr. 4-19: Možné varianty spirální vázy

### 4.3.3 Zakřivený tubus

Zakřivený tubus je speciální typ spirální vázy. U předchozího typu se jedná o těleso s přímkou osou souměrnosti. U tohoto typu tělesa je středová osa zakřivena ve tvaru kruhové oblouku. Geometrie je opět kruhového průřezu. Díky tomuto tvaru lze pozorovat plynulou změnu délky vertikálních kontur ležících na povrchu tělesa. (viz Obr. 4-20). Zakřivený tubus má v první variantě rozšiřující se průřez a ve druhé variantě konstantní velikost průřezu.

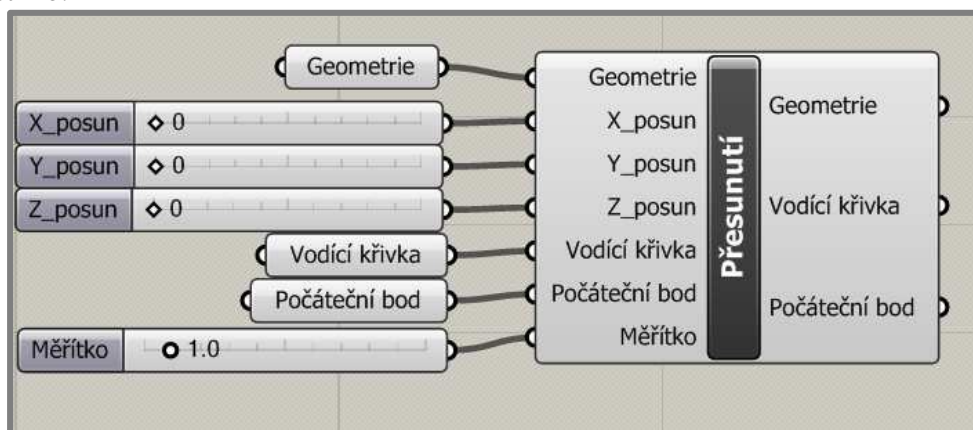


Obr. 4-20: Možné varianty zakřiveného tubusu

#### 4.4 Generování trajektorie

Princip generování trajektorie je závislý především na tvaru a topologii tělesa. Pro každý navržený princip topologie byl vytvořen speciální slicer, který na povrchu digitálního modelu tvoří řadu bodů. Ty jsou následně spojeny do kontinuální křivky, po které se pohybuje koncový bod robotického ramene.

Všechny skripty jsou vybaveny modulem pro přesunutí tělesa po podložce a volbě měřítka – viz Obr. 4-21. Díky tomu lze dynamicky upravovat polohu a velikost, ve které bude těleso tištěno.



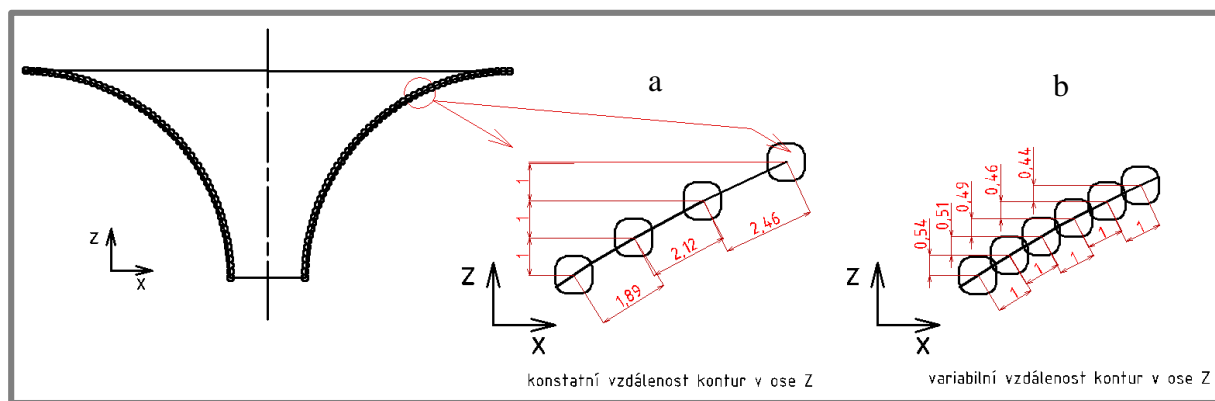
Obr. 4-21: Modul pro změnu polohy a měřítka tělesa

##### 4.4.1 Tvorba a seřazení bodů

Prvním krokem při generování trajektorie je tvorba křivek na povrchu tělesa. U těles z kategorie *zakřivený tubus* nebo *zakřivená otevřená stěna* se křivky tvoří kolmo na plášť tělesa. V případě těles typu *spirální váza* nebo *přímá otevřená stěna* jsou vytvářeny kontury v rovinách rovnoběžných se základnou.

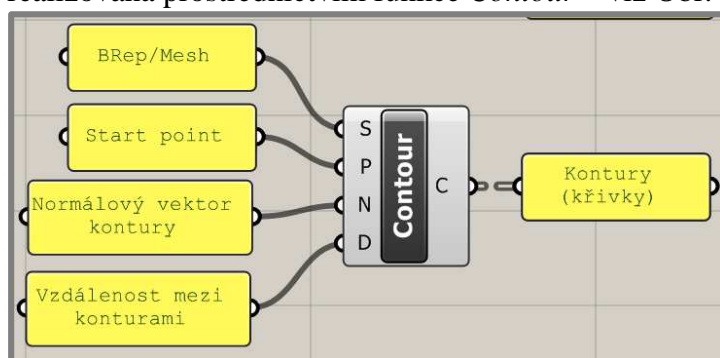
Dle vstupních parametrů lze kontury tvořit dvěma způsoby:

- S konstantní vzdáleností v ose Z – kontury leží v rovinách XY, které jsou od sebe konstantně vzdáleny (Obr. 4-22a)
- S variabilní vzdáleností dle vodící křivky – kontury leží v rovinách XY které protínají body na vodící křivce. Body ležící na křivce mají mezi sebou konstantní vzdálenost (Obr. 4-22b)



Obr. 4-22: Tvorba kontur

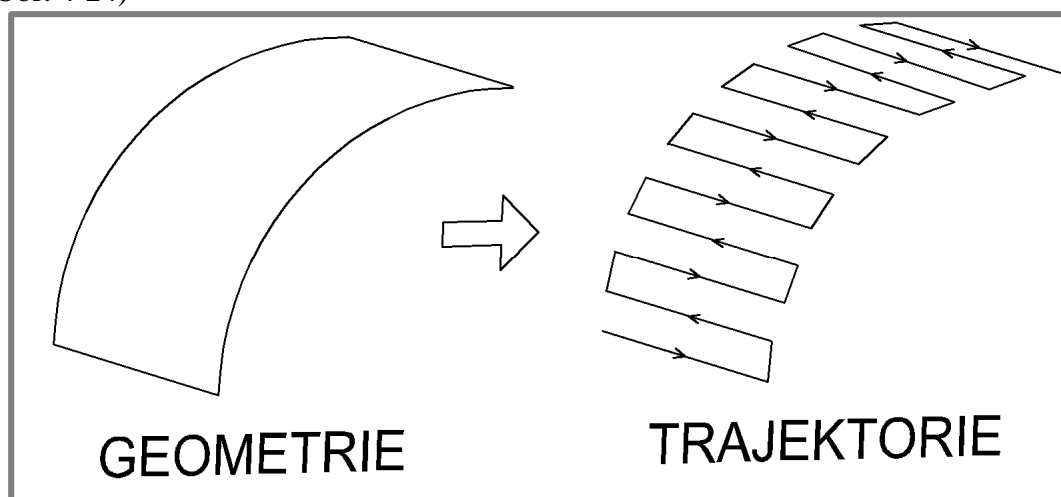
Tvorba kontur je realizována prostřednictvím funkce *Contour* – viz Obr. 4-23



Obr. 4-23: Funkce Contour

### Otevřená stěna

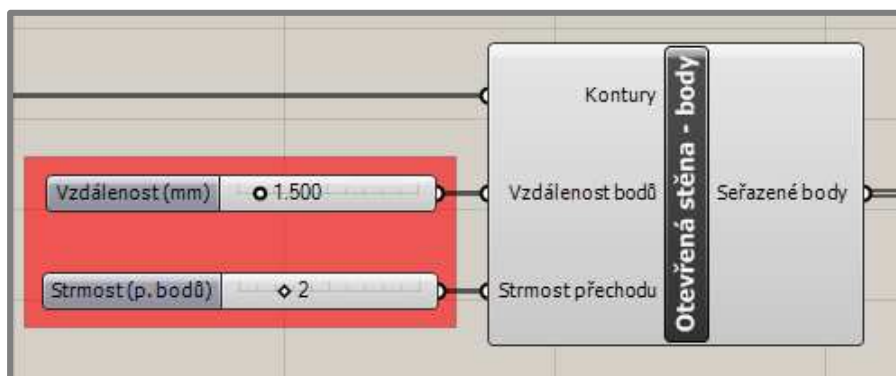
Na vytvořených konturách jsou generovány řady bodů s definovanou roztečí. Princip tvorby trajektorie je u otevřené stěny navržen po horizontálních konturách se střídáním směru pohybu. (viz Obr. 4-24)



Obr. 4-24: Trajektorie na otevřené stěně

Aby mohla být tato trajektorie realizována, je nutné Obrátit pořadí bodů u každé sudé kontury. Poté lze seskupit všechny řady bodů do jedné, ze které je následně generována trajektorie. Tento krok je realizován pomocí vlastního bloku vytvořeného v jazyku Python – Obr. 4-25.



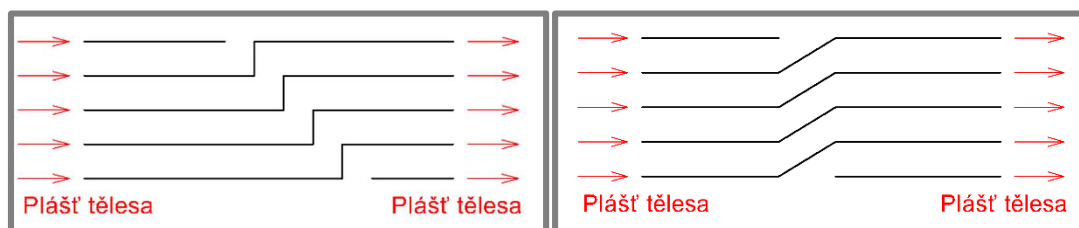


Obr. 4-25: Generování řady bodů – otevřená stěna

### Spirální váza

Vytvořené kontury jsou rozděleny na řady bodů s danou roztečí. Jelikož se jedná o uzavřené křivky, lze pro generování trajektorie užít geometrie spirální vázy. Přechod mezi jednotlivými konturami lze realizovat dvěma způsoby: (Obr. 4-26 – rozvin pláště tělesa)

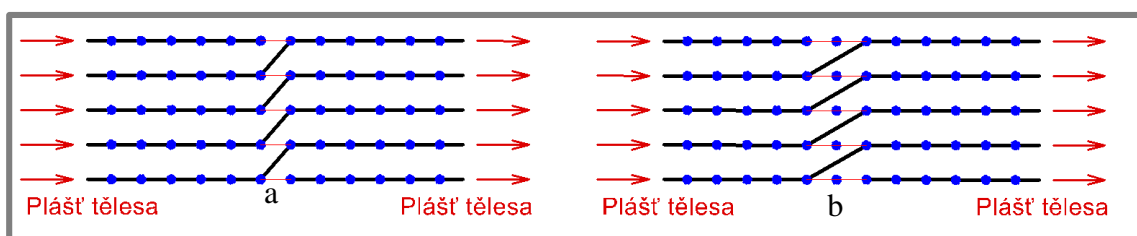
- Vertikální přechod
- Šikmý přechod



Obr. 4-26: Přechod mezi vrstvami – vertikální (a), šikmý (b)

U vertikálního přechodu dochází k výrazné změně směru trajektorie nástroje, což má za následek zpomalení pohybu v tomto místě. To má za následek tvorbu „páteře“ na povrchu tělesa v místě přechodu mezi konturami.

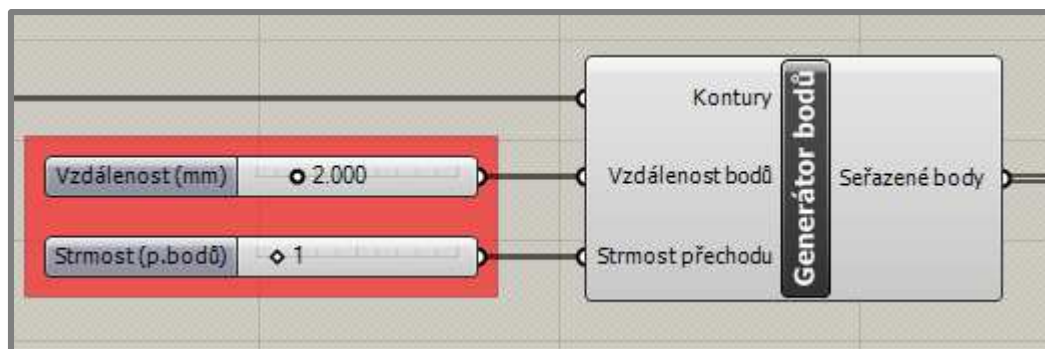
Při šikmém přechodu se zmenšuje úhel přechodu mezi konturami, díky čemuž je méně ovlivněna rychlost koncového bodu nástroje po trajektorii. Stlačování materiálu v místě přechodu je tak výrazně nižší a povrch tělesa hladší. Šikmý přechod je realizován vynecháním posledního bodu na každé kontuře tělesa (Obr. 4-27a). Při požadavku hladšího přechodu mezi konturami lze provést vynechání posledních dvou nebo tří bodů, díky čemuž se přechod stává méně strmým (Obr. 4-27b). Vzniká zde však problém se ztrátou informací o poloze dvou vynechaných bodů, což může mít za následek geometrickou nepřesnost.



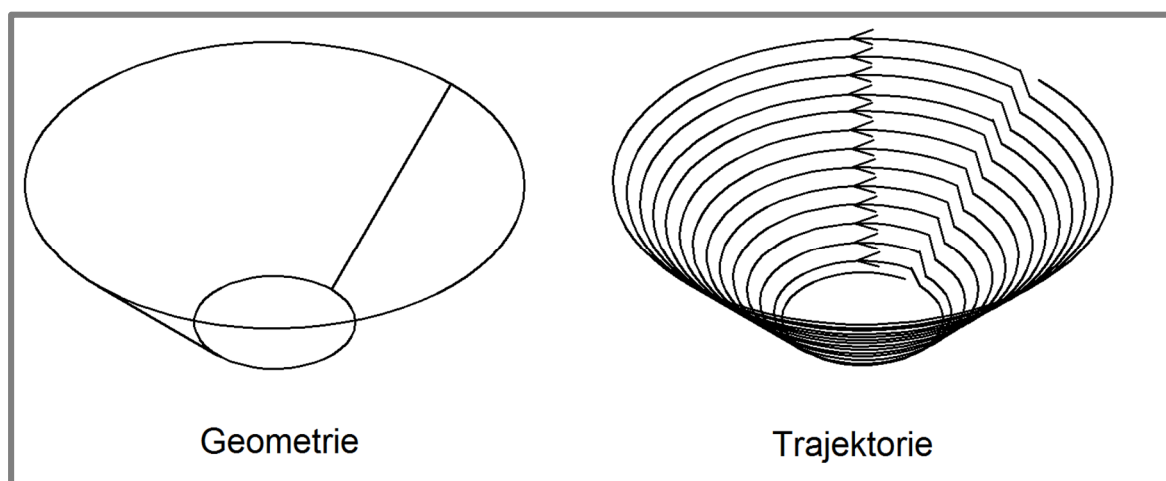
Obr. 4-27: Strmost přechodu v závislosti na počtu vynechaných bodů



Body na jednotlivých konturách jsou poté seřazeny do jedné kontinuální řady, která je spojena ve výslednou trajektorii – viz Obr. 4-29. Skript pro generování trajektorie koncového bodu nástroje pro spirální vázu je zobrazen na Obr. 4-28



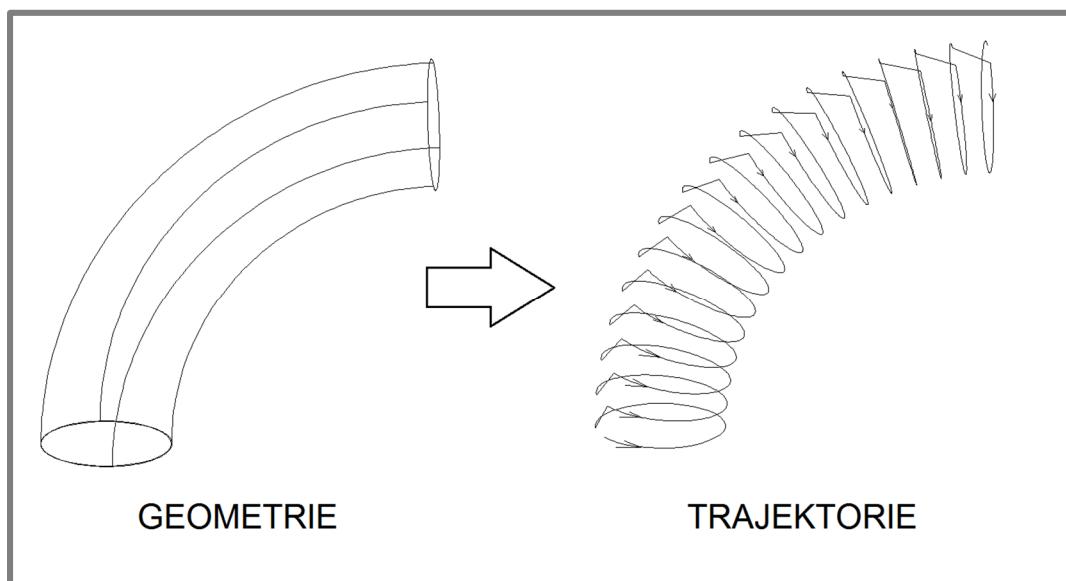
Obr. 4-28: Generování řady bodů – spirální váza



Obr. 4-29: Trajektorie na spirální váze

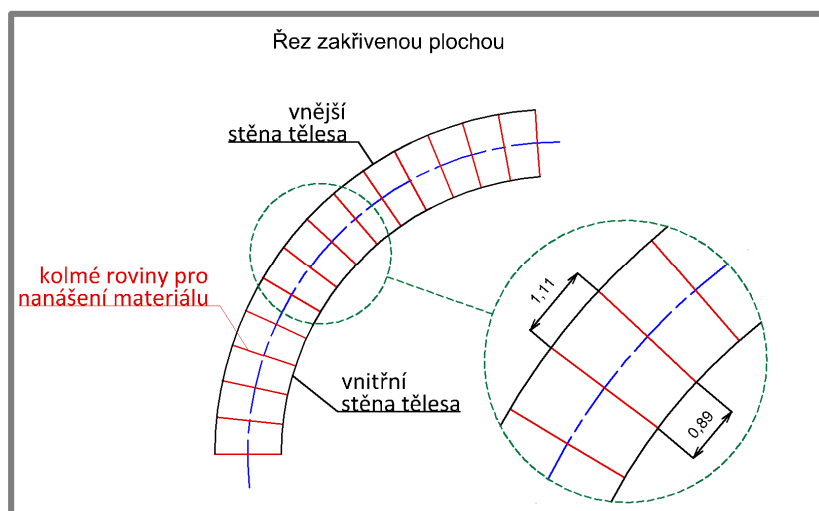
### Trajektorie na zakřiveném tubusu

Zakřivený tubus je speciální variantou spirální vázy, která má zakřivenou středovou osu. Trajektorie je v tomto případě tvořena po rovinách kolmých na vodící křivku (což může být právě středová osa). Jelikož jsou vytvořené křivky na těchto rovinách uzavřené, lze trajektorii koncového bodu nástroje realizovat ve stejné formě, jako u *spirální vázy* – viz Obr. 4-30).



Obr. 4-30: Trajektorie na zakřiveném tubusu

U tohoto typu tělesa dochází k problému s nerovnoběžností křivek. Na vnitřní straně jsou křivky k sobě blíže a u vnější strany jsou naopak více vzdáleny – viz Obr. 4-31

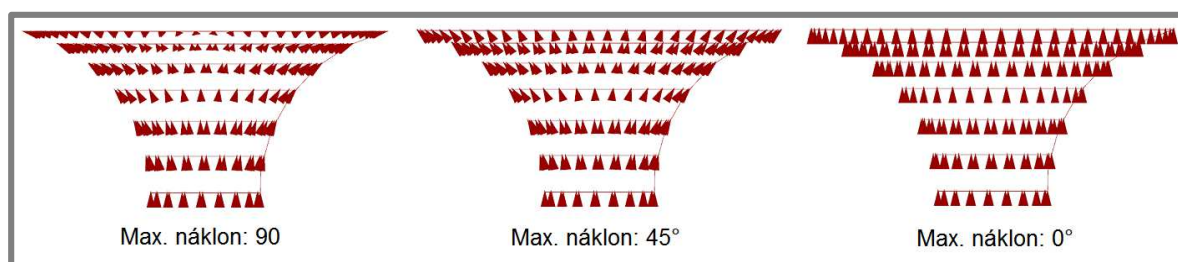


Obr. 4-31: Problém se vzdáleností mezi konturami u zakřiveného tubusu

#### 4.4.2 Náklon tiskové hlavy vůči rovině XY

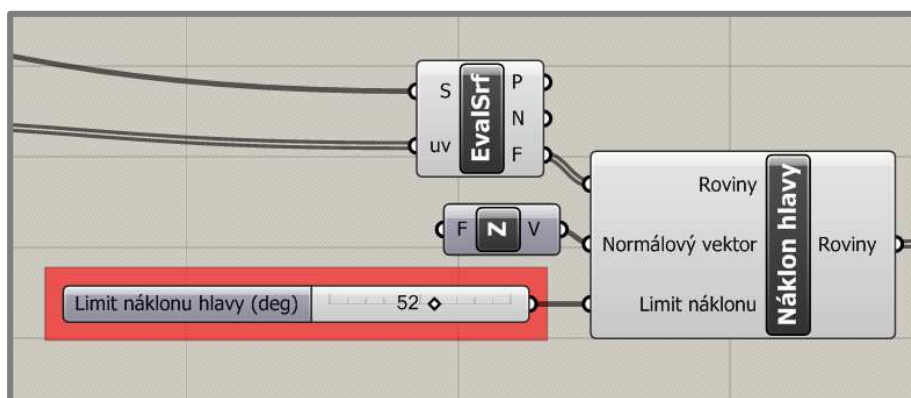
Náklon nástroje vůči výtisku je pro každý bod trajektorie určen pomocí funkce *EvalSurf*. Díky této funkci je získáno dvou tečných vektorů  $u, v$  a normálového vektoru  $w$ . Pomocí vektorů  $u, w$  je poté vytvořena rovina s normálovým vektorem  $v$ . Tato rovina leží na aktuálně nanášené vrstvě a vektor  $v$  je k této vrstvě kolmý. Díky tomu je zajištěn správný náklon tiskové hlavy vůči podložce.

Jelikož je kinematika tiskové hlavy omezená na 6 stupňů volnosti, nelze realizovat jakýkoli náklon tiskové hlavy ve všech bodech spirální vázy. Proto byl algoritmus vybaven nastavitelným maximálním úhlem náklonu tiskové hlavy vůči podložce. Omezení normálového vektoru  $v$  je zobrazeno na Obr. 4-32.



Obr. 4-32: Nastavitelnost maximálního náklonu tiskové hlavy

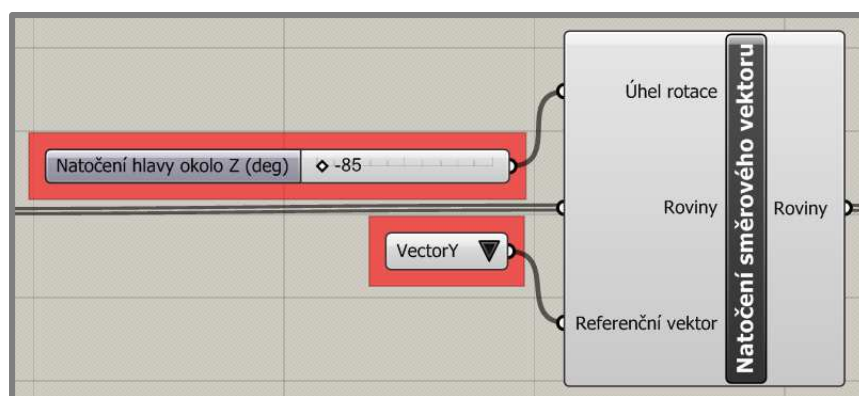
Skript pro zajištění této skutečnosti je realizován pomocí rotace vektorů  $v, w$  okolo vektoru  $u$ . Poté došlo k vytvoření plochy z vektorů  $u, w$  s normálovým vektorem  $v$ . Na Obr. 4-33 je zobrazen vytvořený blok v prostředí Grasshopper.



Obr. 4-33: Skript pro náklon tiskové hlavy

#### 4.4.3 Natočení tiskové hlavy v ose Z

Z funkce *EvalSrf* jsou určeny tečné vektory tělesa pro všechny body trajektorie. Tyto vektory určují směr natočení tiskové hlavy pro daný bod. Jelikož se v případě spirální vázy jedná o rotační těleso, jsou vytvářeny směrové vektory kružnic.

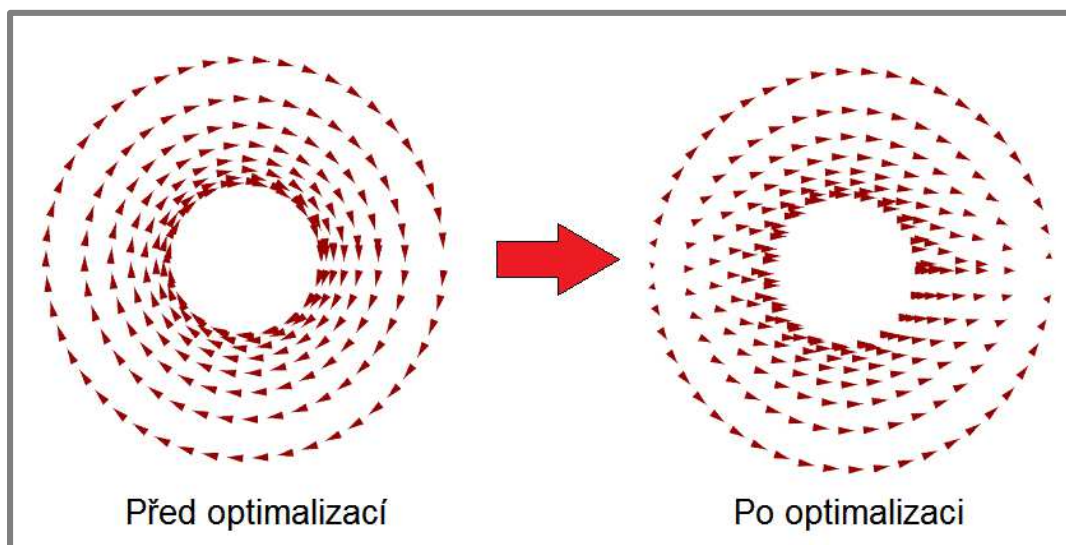


Obr. 4-34: Natočení směrového vektoru tiskové hlavy

To znamená, že tisková hlava při tisku okolo tělesa nejen obíhá, ale také rotuje. Následkem je vysoká kinematická náročnost na osy robotického ramene a problém s maximálním natočením některých os. Tímto způsobem tak nelze tisknout rotační tělesa a je potřeba modifikovat natočení směrových vektorů tak, aby došlo k optimalizaci kinematiky nástroje.

Problém byl vyřešen otočením směrových vektorů  $u$  okolo vektoru  $w$ . Velikost otočení je definována úhlem mezi vektorem  $u$  a referenčním úhlem (např. globální osa X nebo Y). Díky

tomu je eliminována rotace tiskové hlavy při pohybu po uzavřených konturách spirální vázy. Jelikož je snížena kinematická náročnost, má tato optimalizace pozitivní dopad na konstantní rychlost koncového bodu robotického ramene. Pro tento krok byl sestrojen blok funkcí zobrazený na Obr. 4-34.



Obr. 4-35: Optimalizace směrového vektoru

Jak je patrné z Obr 4-35, směrové vektory nejsou ve všech případech rovnoběžné. To je způsobeno tím, že primárním kritériem pro určení roviny je náklon tiskové hlavy vůči podložce. Až poté je přistoupeno k natočení směrového vektoru. Ten je tedy možné natáčet pouze pro kružnici okolo osy Z. Toto omezení způsobuje nerovnoběžnost směrových vektorů.

## 4.5 Optimalizace procesních parametrů

Pro zajištění kvalitní struktury vzhledu povrchu je nutné zoptimalizovat procesní parametry tisku.

### 4.5.1 Rychlost koncového bodu nástroje

Pro zajištění rovnoměrné extruze materiálu je nutná konstantní rychlost koncového bodu robotického ramene. Hodnota rychlosti je určena ve vytvořeném skriptu v prostředí Grasshopper a je definována v jednotkách  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dráha robotického ramene je však interpolována bod po bodu a může tak docházet jak ke geometrickým, tak kinematickým odchylkám. Proto je před spuštěním experimentů nutné ověřit závislost množství bodů na rychlosti koncového bodu tiskové hlavy.

Rychlost lze taktéž regulovat pomocí ovládacího panelu robotického ramene, kde lze volit omezení rychlosti na 1, 3, 10, 30, 50, 75 nebo 100 % rychlosti. Je tedy nutné započítat i faktor zpomalení rychlosti pomocí ovládacího panelu.

### 4.5.2 Výška vrstvy

Výška vrstvy výrazně ovlivňuje množství nanášeného materiálu a také rychlost stavby součásti. Má však také značný vliv na kvalitu struktury povrchu. Realizovány byly dva experimenty s totožnými procesními parametry s výjimkou výšky vrstvy.

### 4.5.3 Teoretický výpočet množství extrudovaného materiálu

Podle zvolené výšky vrstvy, požadované šířky extrudované stopy a rychlosti robotického ramene lze určit množství materiálu, který musí být vytlačován z trysky. Výpočet však určuje

pouze přibližnou hodnotu, jelikož zde není uvažováno prokluzu filamentu na hřídeli krokového motoru a tření mezi roztaveným materiálem a otvorem trysky. Pro zajištění zvolených parametrů se musí objem potřebného materiálu pro danou oblast v trajektorii rovnat objemu vytlačeného materiálu z trysky.

$$V_{trajektorie} = V_{tryska}$$

Objem oblasti na trajektorii lze vypočítat pomocí vztahu:

$$V_{trajektorie} = B \cdot H \cdot L$$

kde:

$V_{trajektorie}$	$m^3$	- objem materiálu v elementu
$B$	$m$	- šířka extrudované stopy
$H$	$m$	- výška vrstvy
$L$	$m$	- délka elementu

Objem vtlačeného materiálu do trysky je dán vztahem:

$$V_{tryska} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h$$

kde:

$V_{tryska}$	$m^3$	- objem materiálu vedeného do trysky
$d$	$m$	- průměr filamentu
$h$	$m$	- délka spotřebovaného filamentu

Délka extrudované stopy potřebná pro výpočet objemu na trajektorii je určená:

$$L = v_{KB} \cdot t$$

kde:

$L$	$m$	- délka elementu
$v_{kb}$	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost koncového bodu nástroje
$t$	$s$	- doba, za kterou koncový bod urazí trajektorii L

Délka spotřebovaného filamentu je získána ze vztahu:

$$h = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{D}{2} \cdot t$$

kde:

$h$	$m$	- délka spotřebovaného filamentu
$n$	$s^{-1}$	- otáčky krokového motoru
$D$	$m$	- průměr hřídele krokového motoru
$t$	$s$	- čas, za který koncový bod urazí trajektorii L

Z těchto vztahů lze určit hodnotu otáček krokového motoru:

$$n = \frac{B \cdot H \cdot v_{KB} \cdot 2}{\pi^2 \cdot d^2 \cdot D}$$

kde:

$n$	$s^{-1}$	- otáčky krokového motoru
$B$	$m$	- šířka extrudované stopy
$H$	$m$	- výška vrstvy
$v_{kb}$	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost koncového bodu nástroje
$d$	$m$	- průměr filamentu

Tuto hodnotu je poté nutné převést na otáčky za minutu (RPM) a poté nastavit na ovládacím panelu tiskové hlavy.

### 4.5.4 Vliv chlazení tištěné součásti

Pro zajištění stability vytištěné vrstvy materiálem PLA dochází k roztékání nanesené vrstvy ve volném směru. To je způsobeno vysokou hodnotu MFI při teplotě viskózního toku. Je proto nutné ověřit, zda je pro realizaci převyšujícího objemu vhodné chladit vytištěnou součást. Pro určení této skutečnosti byly realizovány dva experimenty s totožnými parametry. Výjimkou bylo pouze chlazení součásti. V prvním případě bylo chlazení vypnuto a ve druhém zapnuto se vstupním tlakem přes škrtící ventil 0,02 MPa.

### 4.6 Experimentální 3D tisk

V první fázi experimentálního tisku je nutné ověřit funkčnost zvolených tiskových strategií. Pro realizaci experimentu bylo navrženo tři speciálních těles, na kterých je ověřeno dosažení dostatečné kvality povrchu a rozměrové přesnosti v závislosti na užitých procesních parametrech. Tělesa jsou charakterizována nízkou hodnotu úhlu převisu. Technologii je totiž nejprve nutné odladit na jednoduchá tělesa, u kterých nehrozí borcení materiálu vlivem nedostatečné síly v kontaktu mezi nanesenými vlákny.

Po optimalizaci tiskových strategií a procesních parametrů je přikročeno k realizaci bezpodporového tisku. Volbou různých kombinací rovin tiskových podložek, strategií nanášení materiálu v závislosti na topologii tělesa a procesních parametrů jsou tištěny vzorky těles, jejichž kvalita povrchu, soudržnost vláken a rozměrová přesnost jsou porovnávány v následném vyhodnocení experimentu.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Konstrukční úpravy tiskové hlavy

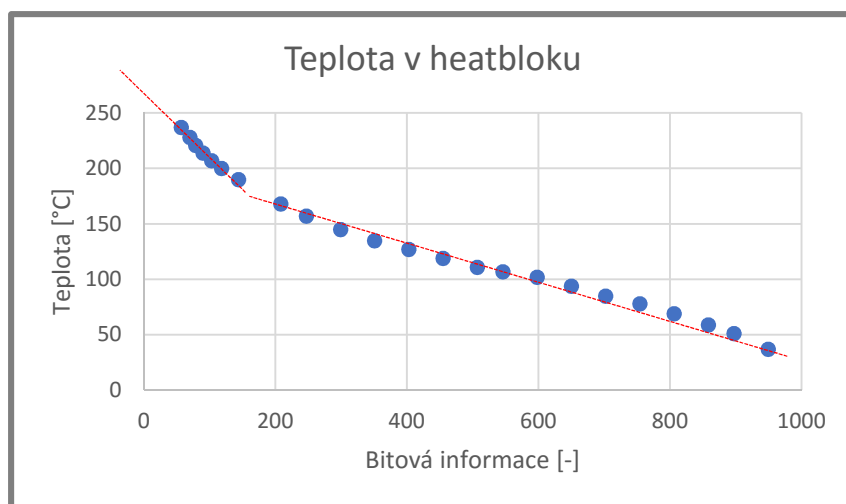
Konstrukčními úpravami trysky zařízení bylo docíleno snížení vrcholového úhlu obálkového kužele zařízení. Kvůli změně geometrie trysky bylo nutné přistoupit k úpravě systému chlazení. Bylo realizováno chlazení pomocí stlačeného vzduchu. Oproti původnímu systému s ventilátory a tubusy zabírá toto řešení daleko menší prostor. Je tak zajištěn menší úhel obálkového kužele od hrotu trysky (z původní hodnoty  $96^\circ$  na  $66^\circ$ ), díky čemuž lze provést větší náklon tiskové hlavy vůči podložce bez hrozby kolize.

Chlazení pomocí stlačeného vzduchu umožňuje snadnou regulaci průtoku. Toho je docíleno pomocí škrtícího ventilu. Požadavkem na pneumatický systém byla především nízká cena. Jelikož zde není příliš nutná přesnost regulace proudu vzduchu, byl pneumatický okruh sestaven převážně z již dostupných komponent.

### 5.2 Úprava ovládacího panelu tiskové hlavy

Pro zajištění stabilnějšího přísunu materiálu do trysky bylo nutné vyměnit driver pro řízení krokového motoru. Jelikož jsou rozměry nového driveru několikanásobně větší než v případně předchozího modelu, bylo nutné najít pro tuto součást nový prostor v boxu elektroniky. Žebrovitá část sloužící jako pasivní chladič zařízení je vyvedena horní stranou ovládacího boxu do prostoru, aby byl zajištěn kvalitní odvod vzduchu. Současně bylo softwarovými úpravami zajištěno přesnější řízení otáček krokového motoru.

Vzhledem ke konstrukčním úpravám trysky bylo nutné provést novou kalibraci přepočtu napětí termistoru na teplotu. Přepočet hodnoty z termistoru na teplotu je nyní přesnější díky interpolaci pomocí dvou přímek (viz Obr. 5-1). Současně byl taktéž vytvořen nový skript pro regulaci teploty. Díky tomu je požadovaná teplota v *trysce* stabilnější.



Obr. 5-1: Převod bitové informace ze termistoru na teplotu - nová verze

### 5.3 Pohyb robotického ramene

Pohyb robotického ramene lze realizovat třemi způsoby. V případě pohybu PTP mezi body dochází k přejezdu po nejrychlejší vzdálenosti mezi body. Rychlost robotického ramene je dána



procentuální hodnotou. Ta je závislá na natočení jednotlivých os a hmotnosti zátěže. Nelze tedy zajistit konstantní rychlost koncového bodu tiskové hlavy.

V případě lineárního pohybu mezi body je rychlost definována v m/s. Lze tak dosáhnout konstantní hodnoty rychlosti. Pohyb mezi body je vykonán po úsečce.

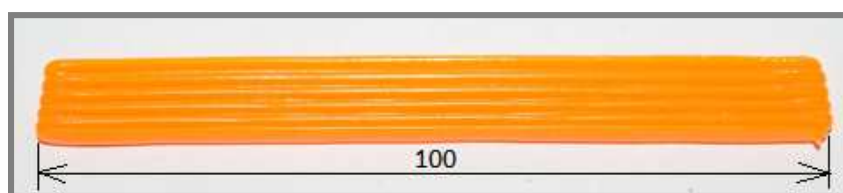
Při trajektorii po splajnu leží všechny body trasy na hladké křivce. Interpolace povrchu tělesa je tak kvalitnější, nicméně za cenu vyšší výpočtové náročnosti.

Z výše uvedených poznatků vyplývá jako ideální řešení užití lineárního pohybu po vytvořené trajektorii.

## 5.4 Optimalizace procesních parametrů

### 5.4.1 Rychlost koncového bodu nástroje

Na testovacích tělíscích ve tvaru obdélníku (viz Obr. 5-2) bylo provedeno experimentální ověření rychlosti koncového bodu robotického ramene.



Obr. 5-2: Vzorek pro určení rychlosti tisku

Ve vytvořeném sliceru v prostředí Grasshopper bylo za rychlost LIN pohybu nastaveno 1 m/s. Rychlost robotického ramene byla omezena na 10 %. Předpokládaná rychlost robotického ramene byla tedy:

$$v_t = K_p \cdot v = 0,1 \cdot 1 \text{ m s}^{-1} = 0,1 \text{ m s}^{-1},$$

kde:

$v_t$	$\text{m s}^{-1}$	- teoretická (předpokládaná) rychlost
$K_p$	-	- procentuální hodnota rychlosti na ovládacím panelu
$v$	$\text{m s}^{-1}$	- rychlost robotického ramene nastavená v SRC kódu

Reálná rychlost koncového bodu byla určena pomocí délky trajektorie jedné vrstvy (0,1 m) uražené za čas (29,86 s):

$$v_r = \frac{s}{t} = \frac{0,1 \text{ m}}{29,86 \text{ s}} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1},$$

kde:

$v_r$	$\text{m s}^{-1}$	- reálná rychlost koncového bodu nástroje
$s$	m	- délka testovací trajektorie
$t$	s	- čas, za který byla testovací trajektorie dosažena

Reálná rychlost koncového bodu je oproti teoretické rychlosti o 2 řády nižší. Dalším krokem v postupu projektu je zajištění shody teoretické a reálné rychlosti robotického ramene. Tato skutečnost je způsobena nízkou roztečí mezi body trajektorie, po které robot musí interpolovat svůj pohyb. Jelikož interpolace probíhá na několik bodů před danou polohu, výpočet zpomaluje pohyb ramene tak, aby jeho rychlost byla konstantní a zároveň trajektorie ramene odpovídala řadě vygenerovaných bodů.

Řešením problému je také manuální snížení maximální rychlosti robotického ramene pro SRC kód, přičemž procentuální rychlost na ovládacím panelu robota je navýšena na hodnoty nad 50 %. Zde však hrozí riziko zrychleného pohybu robotického ramene při nájezdu a odjezdu z tisku (pokud je špatně nastavena hodnota rychlostí těchto přejezdů), což má za následek riziko poškození zařízení nebo laboratoře.

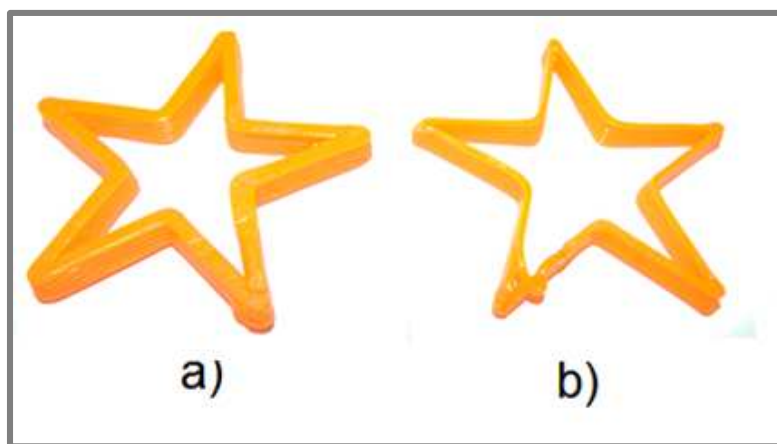
### 5.4.2 Tloušťka stěny tělesa

Byl proveden experimentální tisk s požadavkem na různou tloušťku stěny. Toho bylo dosaženo změnou otáček krokového motoru unášejícího filament do trysky. Tab. 5-1 zobrazuje užité procesní parametry při experimentálním tisku. Otáčky krokového motoru byly určeny výpočtem popsaném výše.

Tab. 5-1: Procesní parametry – vliv množství extrudovaného materiálu

Vzorek	Požadovaná tloušťka stěny [mm]	Rychlost robotického ramene [mm/s]	Otáčky krok. motoru pro vytlačování filamentu [ $\text{min}^{-1}$ ]	Výška vrstvy [mm]	Teplota hotendu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
A	4,5	7,6	7,5	0,7	210
B	2,0	7,6	7,5	0,7	210

Naměřené tloušťky stěny jsou v případě vzorku A 4,3 mm (Obr. 5-3a) a v případě vzorku B 1,88 mm (Obr. 5-3b). Přepočítání mezi otáčkami krokového motoru a požadovanou tloušťkou stěny v závislosti na rychlosti pohybu robotického ramene je potřeba zkalibrovat. Mezi krokovým motorem a filamentem totiž dochází ke skluzu. Vliv na přesnost výpočtu má také tření mezi roztaveným materiálem a otvorem trysky. Tyto faktory snižují rychlost vytlačování, která se projeví na menší tloušťce stěny.



Obr. 5-3: Testovací objekty – tloušťka stěny

### 5.4.3 Nezávislost množství bodů na rychlosti

V předchozí fázi projektu docházelo při některých experimentech k nerovnoměrnému pohybu koncového bodu. To mělo za následek nerovnoměrné množství naneseného materiálu po trajektorii. Trajektorie nově vytvořeného sliceru je generována pro konstantní rychlost nezávislou na množství bodů. Tato skutečnost byla experimentálně ověřena. Při vyšším množství bodů je vzdálenost mezi sousedními body kratší. Předpokladem lineárního pohybu je však pohyb konstantní rychlostí. Ověření této skutečnosti popisuje Tab. 5-2.

Tab. 5-2: Nezávislost pohybu na počtu bodů

Délka trajektorie [mm]	Vzdálenost mezi body [mm]	Počet bodů [-]	Doba pohybu po trajektorii [s]
1186	1	1186	349,62
1186	0,5	2327	348,56

Z hodnot doby pohybu vyplývá, že rychlost není závislá na množství bodů trajektorie.

#### 5.4.4 Vliv chlazení

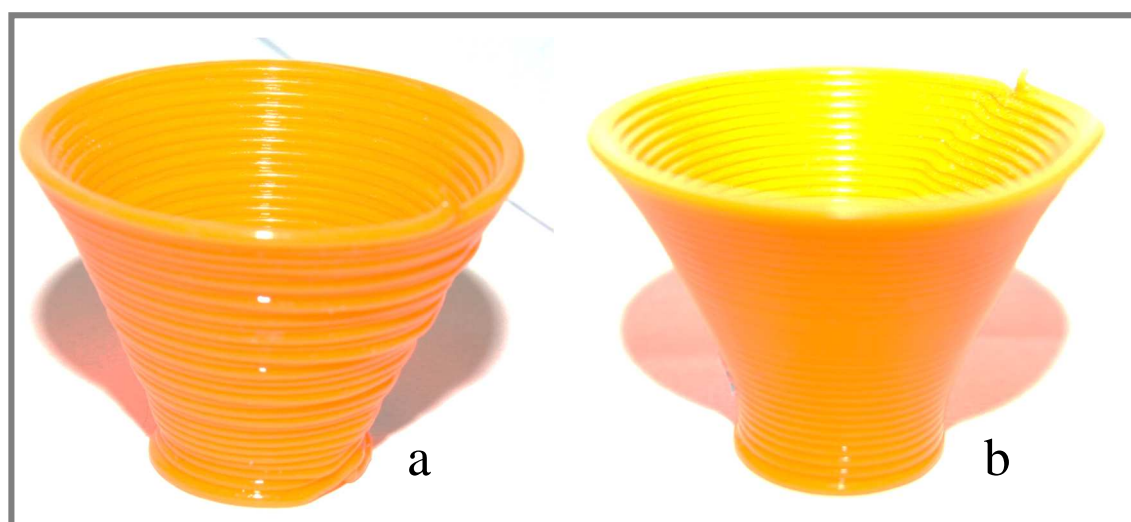
Jako materiál pro tisk pomocí robotického ramene je využíváno PLA. Díky nízké hodnotě smrštitivosti není potřebné zahřívat podložku, na kterou je materiál nanášen. Nízká hodnota indexu MFI znamená vyšší viskozitu materiálu po nanesení. To způsobuje geometrické nepřesnosti, protože se materiál roztéká na nežádoucí místa.

Součástí užívané tiskové hlavy jsou ventilátory sloužící k chlazení tištěného tělesa. Byl proveden experimentální tisk se zachováním stejných procesních parametrů (viz Tab. 5-3).

Tab. 5-3: Procesní parametry tisku – vliv chlazení

Rychlost ramene [mm s <sup>-1</sup> ]	Otáčky krok. motoru pro vytlačování filamentu [min <sup>-1</sup> ]	Výška vrstvy [mm]	Teplota hotendu [°C]
8,7	9,5	1	210

V prvním případě bylo chlazení tištěného modelu vypnuto (Obr. 5-4a), ve druhém zapnuto (Obr. 5-4b).



Obr. 5-4: Vzorek vytištěný bez chlazení (a) a s chlazením (b)

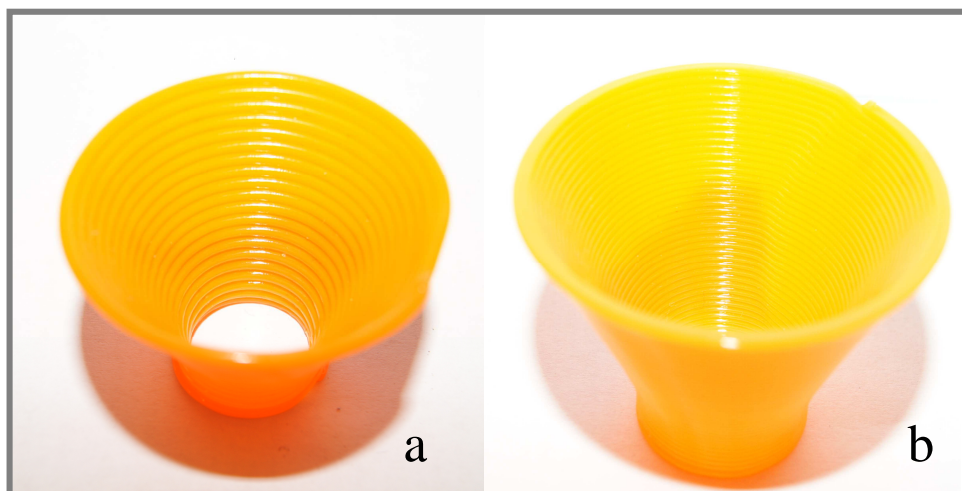
Ze struktur obou povrchů je patrný výrazný podíl chlazení na výsledné kvalitě povrchu tělesa. Doba tisku byla v obou případech totožná.

#### 5.4.5 Výška vrstvy

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.5, výška vrstvy má zásadní vliv na kvalitu povrchu. Na Obr. 5-5 lze vidět porovnání výtisků. V Tab. 5-4 jsou poté zobrazeny procesní parametry tisku.

Tab. 5-4: Procesní parametry – vliv výšky vrstvy

Vzorek	Výška vrstvy [mm]	Rychlost robotického ramene [mm s <sup>-1</sup> ]	Otáčky krok. motoru pro vytlačování filamentu [rpm]	Teplota hotendu [°C]	Doba tisku [s]
A	1,5	8,7	9,50	210	285
B	0,7	8,7	5,25	210	607



Obr. 5-5: Vzorek s výškou vrstvy 1,5 mm (a), 0,7 mm (b)

Vyšší kvalita povrchu u vzorku s nižší výškou vrstvy (jak je patrné z Obr. 5-5) však s sebou nese delší dobu tisku.

## 5.5 Experimentální tisk

Klíčovou silou pro zajištění soudržnosti vláken je síla adhezní. Jelikož dochází k tisku na nezahřívanou podložku, je komplikované zajistit dostatečnou teplotu vytištěné součásti tak, aby mohlo dojít k difúzi mezi vlákny. S rychlým poklesem teploty tištěného modelu souvisí také požadavek na materiál z hlediska smrštivosti. Ta způsobuje deformaci v tělese, což může mít za následek odlepení tělesa z podložky a tím pádem neúspěšné ukončení experimentu. V práci byly porovnány vlastnosti různých materiálů, přičemž pro aplikaci robotického 3D tisku je nejvhodnější, díky nízké smrštivosti, materiál PLA.

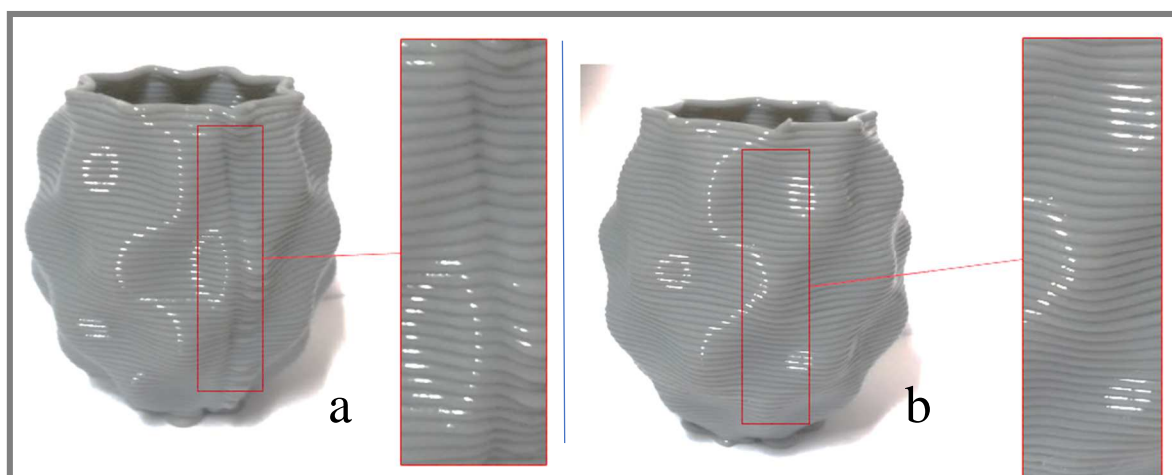
Před realizací bezpodporového 3D tisku je nutné otestovat schopnost tvorby těles ve formě otevřených a uzavřených ploch. Poté je možné provést experimenty s tiskem převislých objemů.

### 5.5.1 Ověření funkčnosti sliceru

Před samotnou realizací převislých objemů bylo nutné ověřit funkčnost sliceru na jednodušších tělesech. Proto byly navrženy testovací tělesa, ve kterých se vyskytují pouze malé úhly převisu, aby nedošlo k ovlivnění vytištěného výsledku nedostatečnou kontaktní silou mezi nanesenými vlákny.

#### Tisk uzavřených ploch

Pro testování byl zvolen přístup tvorby trajektorie po konturách povrchu tělesa s vertikálním (Obr. 5-6a) a šikmým (Obr. 5-6b) přechodem mezi konturami (více v kapitole 4.4.1). Těleso je navrženo bez výrazných převislých objemů, aby byly eliminovány vlivy, které mohou způsobovat borcení materiálu nedostatečnou silou ve spoji vláken.

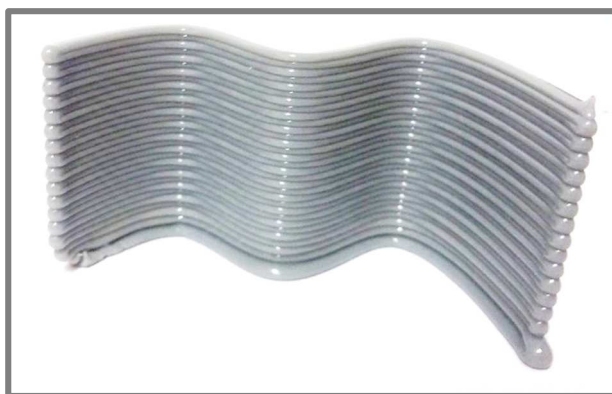


Obr. 5-6: Vytištěný vzorek s vertikálním (a) a šikmým (b) přechodem mezi vrstvami

Z experimentu je patrné, že při vertikálním přechodu mezi vrstvami dochází ke stlačení materiálu, což se negativně projevuje na kvalitě vytištěného modelu. Naopak u šikmého přechodu mezi vrstvami je přechod nepatrný. Proto bylo přikročeno ke generování trajektorie se šikmým přechodem mezi konturami.

#### Tisk otevřených ploch

Při tisku otevřených ploch nelze na povrchu tělesa vytvářet kontinuální spirálu (více v kapitole 4.4). Nanášení materiálu je tedy prováděno po konturách tělesa se střídáním směru pohybu. Přechod mezi konturami může být realizován pomocí vertikálního přechodu nebo přechodu po hladké křivce. Pro nižší výpočtovou náročnost bylo přikročeno k vertikálnímu přechodu. Pro ověření kvality generované trajektorie byl realizován tisk otevřené stěny bez převislého objemu.



Obr. 5-7: Tisk otevřené plochy

Z experimentu, jehož výsledek je zobrazený na Obr. 5-7, je patrné, v místě přechodu mezi konturami nedochází k výraznému stlačování materiálu. Pro účely tisku je tedy zvolen tento způsob nanášení materiálu. Varianta s přechodem po hladké křivce byla tedy zamítnuta pro vyšší výpočtovou náročnost.

#### **5.5.2 Spirální váza s převislým objemem**

Pro realizaci převislého objemu byly testovány různé kombinace tiskových strategií s volbou roviny podložky, volitelným náklonem tiskové hlavy a sadou dalších ověřených procesních parametrů.



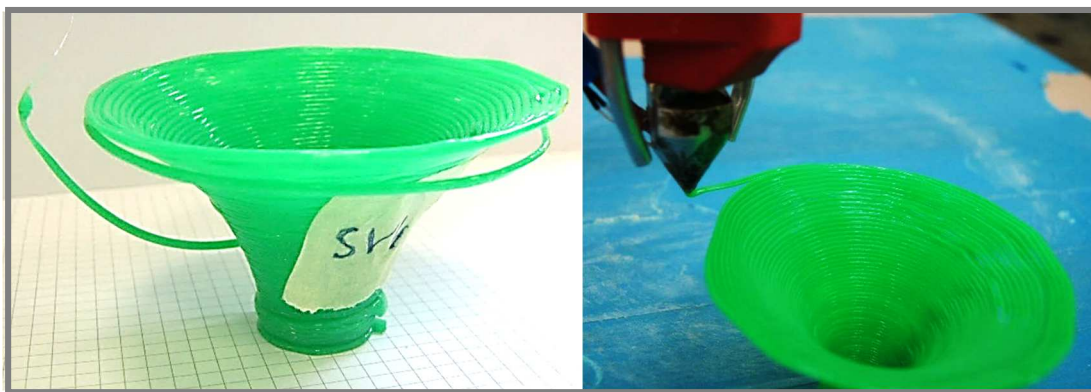
## Spirální váza v rovině XY

Nejjednodušším experimentem u topologie spirální vázy je tisk na podložku v rovině XY. Není potřeba žádné konstrukce pro ustavení podložky do požadované polohy. Podložka pouze leží na svářečském stole.

Pro ověření schopnosti bezpodporového tisku byly navrženy 4 strategie – viz Tab. 5-5

Tab. 5-5: Strategie tisku - spirální váza v rovině XY

Vzorek	Náklon hlavy	Trajektorie
1	NE	Kontury – konstantní vzdálenost
2	ANO – max. 36 °	Kontury – konstantní vzdálenost
3	NE	Kontury – vodící křivka
4	ANO – max. 36 °	Kontury – vodící křivka



Obr. 5-8: Vzorek 1

Vzorek 1 (Obr. 5-8) vykazuje problém s geometrickou přesností, jelikož trajektorie nástroje je vykonávána po konturách, které jsou konstantně vzdáleny v ose Z – viz Obr. 4-21. To má při tisku převyšujícího objemu následek tisk do volného prostoru. Materiál je poté tažen tryskou a postupně přilepován k vytištěnému tělesu. Díky této skutečnosti ve výsledku dochází k nanášení menšího množství materiálu, než je potřeba pro vytvoření spirální vázy. To se projevuje na rozměru horního průřezu tělesa, který vykazuje výraznou odchylku vůči požadovanému tvaru.

U vzorku 2 sice dochází ke změně tiskové strategie náklonem tiskové hlavy vůči výtisku, problém s nanášením do volného prostoru však zůstává a výtisk vykazuje podobnou hodnotu nepřesnosti jako u první varianty (viz Obr. 5-9).



Obr. 5-9: Vzorek 2

## VÝSLEDKY

Pro vzorky 3 a 4 bylo přikročeno ke generování kontur pomocí vodící křivky. Díky tomu je zajištěno nanášení materiálu s konstantní vzdáleností mezi jednotlivými závitů spirální vázy.



Obr. 5-10: Vzorek 3

U vzorku 3 dochází k výraznému navýšení geometrické přesnosti oproti vzorků 1 a 2. To je způsobeno především změnou v generování kontur. Absence náklonu tiskové hlavy zapříčiňuje nekvalitní strukturu materiálu, jelikož dochází ke částečnému stékání nanesených vrstev (viz Obr. 5-10). Při užití náklonu tiskové hlavy (vzorek 4) je tento problém odstraněn, jelikož silové působení od nástroje je směřováno do již vytištěného tělesa. Díky tomu je dosaženo kvalitnějšího povrchu tělesa (viz Obr. 5-11).

Ze zjištěných skutečností vyplývá potenciál bezpodporového 3D tisku při generování trajektorie s variabilní vzdáleností kontur v ose Z a užitím náklonu tiskové hlavy ve směru tištěného tělesa. Tab. 5.6 zobrazuje dosažené parametry vzorků.

Tab. 5-6: Spirální váza na podložce XY – vzorky

Vzorek	1	2	3	4
Průměr horní podstavy (mm)	104	104	96	145
Výška tělesa (mm)	60	63	56	64
Počet generovaných kontur	64	64	90	90
Maximální náklon nástroje (°)	0	34	0	34
Dosažený úhel převisu (°) <sup>1</sup>	-	-	-	88

<sup>1</sup> U vzorků 1, 2 a 3 nelze považovat realizaci převisu za úspěšnou.





Obr. 5-11: Vzorek 4

### Spirální váza v rovině XZ

Pro ověření schopnost tisku na rovinu kolmou k pracovnímu stolu bylo užito nejúspěšnější strategie z předchozího měření – varianty č. 4, kde dochází ke kombinaci náklonu tiskové hlavy s nanášením materiálu po konturách s variabilní vzdálenosti v kolmém směru k podložce.



Obr. 5-12: Vzorek 5 - tisk na rovinu XZ

Vlivem gravitačního působení dochází k stékání materiálu, což má za následek zhoršení kvality povrchu tištěného tělesa. Při realizaci experimentu bylo dosaženo náklonu tiskové hlavy  $32^\circ$  vůči rovině podložky. Velikost průměru horní podstavy vykazuje odchylku 1 mm vůči požadovanému tvaru. Dosaženo bylo vytištění spirální vázy s úhlem převisu  $90^\circ$  vůči normále podložky.

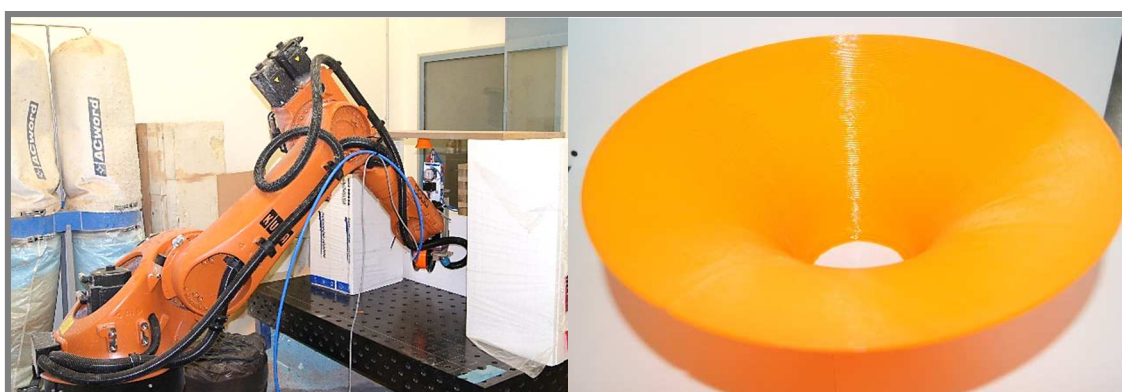
### Spirální váza v rovině -XY

Tisk na podložku v rovině -XY byl proveden ve dvou strategiích – bez náklonu a s náklonem tiskové hlavy vůči rovině podložky. V obou případech bylo užito generování kontur pomocí vodící křivky, takže jsou kontury od sebe ve směru záporné osy Z variabilně vzdáleny.



Obr. 5-13: Vzorok 6 - tisk v rovině -XY bez náklonu tiskové hlavy

Podložka byla usazena na polystyrenové desky, její poloha zkalibrována v ose Z pomocí plechových podložek a vyrovnána pomocí vodováhy.

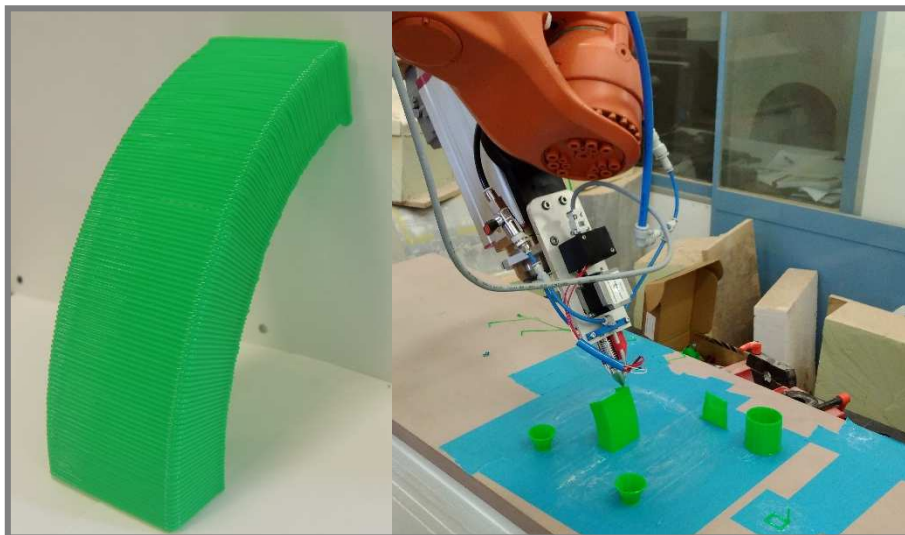


Obr. 5-14: Vzorok 7 - tisk v rovině -XY s náklonem tiskové hlavy

Maximální náklon tiskové hlavy vůči podložce je v tomto případě omezen konstrukcí pod podložkou. V rámci experimentu byl realizován tisk s maximálním náklonem nástroje o úhel  $18^\circ$ . Nanášením materiálu proti směru působení gravitace dochází k simulaci převisu s úhlem  $180^\circ$ . Směr vytlačování materiálu zajišťuje dostatečnou sílu v kontaktu mezi jednotlivými vlákny. Nedochází tak k výraznému stékání naneseného materiálu. Kvalita povrchu je tedy lepší než u vzorku, který byl tištěn na podložku ležící v rovině XZ. Při experimentálním tisku bylo dosaženo plného tvaru testovacího tělesa. Rozměrová přesnost průměru větší podstavy vykazuje max. odchylku 0,5 mm.

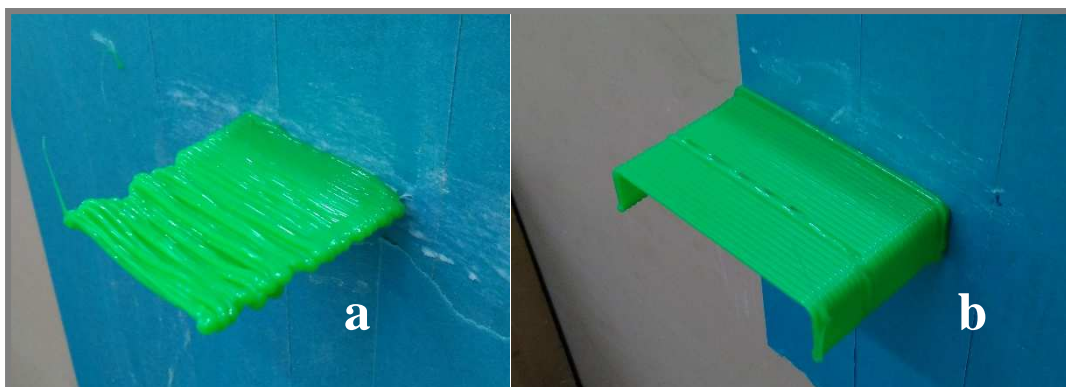
### 5.5.3 Otevřená plocha s převislým objemem

Otevřená plocha byla realizována se zakřivenou vodící křivkou. Tisk probíhal z podložky XY s postupným nárůstem úhlu do  $90^\circ$ . Bylo dosaženo kompletního tvaru tělesa, tedy  $90^\circ$  úhel převisu (viz Obr. 5-15). Pro realizaci převisu bylo nutné omezit náklon tiskové hlavy na maximální hodnotu  $60^\circ$ , aby nedošlo ke kolizi cívky filamentu s pracovním stolem.



Obr. 5-15: Vzorek 8 – Zakřivená otevřená stěna

Pro experimentální tisk na podložku v rovině XZ byla užita plocha s přímou vodící křivkou – jedná se tedy o nezakřivenou desku. Pozorována byla vzdálenost, při které dojde ke zborcení materiálu. První varianta modelu (vzorek 9) je reprezentována stěnou ve tvaru obdélníků, druhá (vzorek 10) je poté vybavena lemy, které zvyšují modul průřezu v ohybu.



Obr. 5-16: Otevřená plocha na podložce v rovině XZ - vzorek 9 (a), vzorek 10 (b)

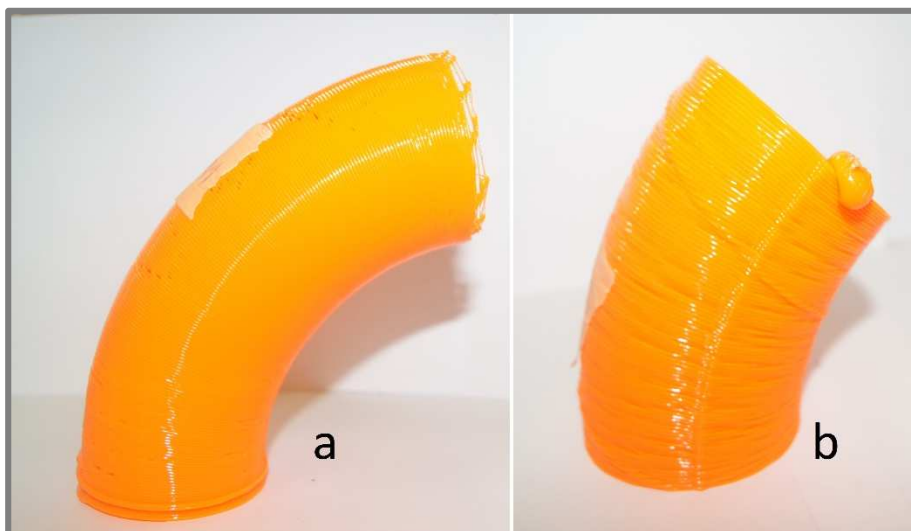
Z obrázků je patrné, že u první varianty dochází k výrazným tiskovým vadám vlivem nedostatečné tuhosti desky ve směru působení gravitace. V případě desky s lemy je výtisk o poznání kvalitnější. Díky zvýšené tuhosti je materiál zajištěn vůči gravitačnímu působení a umožňuje tak nanášení dalších vrstev na příslušné místo. U tisku vzorku č.10 došlo k tiskové vadě v důsledku vzpříčení filamentu při navíjení z cívky – více v kapitole 6.3.

#### 5.5.4 Zakřivený tubus s převislým objemem

U tělesa ve tvaru zakřiveného tubusu je realizováno nanášení materiálu v podobném smyslu jako u spirální vázy. Trajektorie je však tvořena po křivkách ležících v kolmých řezech k tělesu.

Nanášení materiálu probíhalo na roviny podložky XY a –XY (viz Obr. 5-18).

Při tisku na podložku v rovině XY bylo dosaženo maximálního úhlu převisu o hodnotě  $88^\circ$  (viz Obr. 5-17a), poté došlo k vzniku tiskové vady, která se s každou další vrstvou šířila po obvodu tělesa.



**Obr. 5-17:** Zakřivený tubus v roviny podložky XY – vzorek 11 (a) a -XY – vzorek 12 (b)

Při realizaci experimentálního tisku na rovinu  $-XY$  (viz Obr. 5-17b) bylo dosaženo pouze převisu přibližně  $60^\circ$  vůči rovině podložky. Poté došlo k odtržení nanášené vrstvy z tělesa, čímž nebyla vytvořena dostatečná základna pro další nanášení další vrstvy materiálu. Na povrchu tělesa se také vyskytují otvory (tiskové vady). Ty jsou způsobeny nekvalitním vinutím filamentu na plastové cívce. Při zaseknutí filamentu nedokázal krokový motor navíjet materiál do trysky a tak došlo k vzniku těchto tiskových vad.



**Obr. 5-18:** Tisk zakřiveného tubusu na podložku v rovině  $-XY$



## 6 DISKUZE

### 6.1 Vyhodnocení experimentů

Schopnost tvorby převíslých objemů byla ověřena na 3 typech testovacích těles – spirální váze, otevřené stěně a zakřiveném tubusu. Každé těleso je realizováno pomocí jiného přístupu tvorby trajektorie.

Při tisku na podložku ležící v rovině XY je materiál nanášen ve směru gravitačního působení. Náklonem tiskové hlavy je část síly od nástroje absorbována vytištěným tělesem. Podle této myšlenky byla vytvořena hypotéza dosažení kvalitnějších výsledků při natočení tiskové hlavy ve směru tečny tělesa vůči tisku bez náklonu tiskové hlavy. Tato hypotéza byla potvrzena při 3D tisku spirální vázy s náklonem a bez náklonu tiskové hlavy. Díky náklonu je dosaženo kvalitnější struktury povrchu (zhodnoceno pouze subjektivně), výrazně menších tiskových vad a především většího úlhu převisu, při kterém nedochází k borcení nanášené vrstvy.

Změnou roviny podložky dochází ke změně silového působení. Při tisku na podložku –XY směřuje síla od nástroje proti gravitačnímu působení, díky čemuž je potřeba menších kontaktních sil pro zajištění soudržnosti vláken. Tato hypotéza byla potvrzena vytvořením kompletního tělesa spirální vázy s rostoucím úhlem převisu z  $0^\circ$  na  $90^\circ$ . Kvalita povrchu je dle subjektivního zhodnocení dostatečná, výskyt tiskových vad formou trhlin a otvorů je nulový a celkové rozměry tělesa odpovídají požadovanému tvaru.

### 6.2 Výhody technologie

Mezi největší výhody technologie patří větší pracovní prostor a možnost náklonu tiskové hlavy.

#### 6.2.1 Tisk s náklonem hlavy

Díky 6 stupňům volnosti robotického ramene je dosažena daleko vyšší volnost pohybu nástroje vůči podložce. To způsobuje nejen možnost náklonu tiskové hlavy vůči výtisku, ale také modifikaci roviny podložky vůči směru gravitačního působení. Experimentální 3D tisk byl realizován na rovině rovnoběžné s pracovním stolem (XY), kolmé s pracovním stolem a také na rovině, která má obrácený normálový vektor vůči rovině pracovního stolu (-XY). Díky těmto skutečnostem byl prověřen vliv kontaktní síly mezi vlákny na soudržnost tištěného tělesa.

Realizace tisku na podložky XZ a -XY simuluje nanášení materiálu pod úhlem  $90^\circ$ , resp.  $180^\circ$ . Úspěšnost těchto experimentů dokazuje při dodržení procesních parametrů schopnost nanášení materiálu pod daleko většími úhly než je hodnota cca  $45 - 60^\circ$ , jak je tomu u klasických konceptů 3D tiskáren.

### 6.3 Zjištěné problémy, limity technologie

Během experimentů bylo nalezeno několik nedostatků zařízení. Tyto problémy lze rozdělit do tří skupin – problémy, které byly opraveny v průběhu řešení projektu, problémy přesahující oblast řešení projektu a limity technologie 3D tisku pomocí robotického ramene.

#### 6.3.1 Výkon topného tělesa

Kvůli nedostatečnému výkonu topného tělesa dochází k výraznému omezení rychlostí tisku. Pro realizaci experimentů bezpodporového 3D tisku je tato rychlost dostačující, nicméně např. pro velkorozměrový tisk vrstvu po vrstvu případě formou prutových konstrukcí je tato rychlost příliš pomalá.

Jako řešení se nabízí přidání druhého topného tělesa do *heatbloku*, čímž by byl zdvojnásoben topný výkon. Nicméně zde realizace naráží na nedostatečný výkon zdroje, který by tento krok nedokázal pokrýt. Součástí řešení je tedy taktéž výměna zdroje za výkonnější typ, např. LED

zdroj 12V 240W HPS-12-240. Tento zdroj má oproti aktuálnímu dvojnásobný výkon, což poskytuje dostatečnou rezervu pro zapojení nejen topné patrony, ale také dalších aktivních prvků, které mohou zlepšit možnosti extruderu – např. snímače polohy, díky kterým lze řídit množství dodávaného materiálu

### 6.3.2 Upevnění trysky

Tryska je v současném řešení upevněna k nástavci pasivního chladiče pomocí závitu M8. Jelikož se jedná o rozdílné materiály (ocelový nástavec a duralová tryska), dochází k různým hodnotám deformace vlivem tepla. To má za následek otlačení závitu v místě spoje. Problém pak nastává u údržby, kdy je nutné před uvolněním buď trysku zahřát, nebo použít velkou sílu pro odmontování. To s sebou nese riziko poškození závitu, což může mít za následek nedokonalé zajištění polohy trysky vůči nástavci. Díky této skutečnosti mohou vznikat odchylky koncového bodu trysky vůči ideální trajektorii, což způsobuje nekvalitní povrch tištěné součásti.

Současné řešení trysky je taktéž problematické z hlediska kabeláže k topné patroně a termistoru. Při demontáži dochází ke kroucení kabelů, což může mít za následek jejich poškození. Jako opatření je možné realizovat vysunutí termistoru a topné patrony před demontáží a jejich opětovné nasazení po montáži.

Řešením může být výroba nástavce s přírubou, ke které bude tryska přišroubována mimo středovou osu. Pomocí tohoto spoje bude zajištěna radiální poloha trysky, axiální polohu lze řešit dorazem mezi tryskou a výstupkem z příruby. Druhým řešením je výroba trysky s nástavcem z jednoho kusu. Zajištění axiální polohy je poté možno realizovat dorazem v pasivním chladiči a radiální zajištění je možné provést např. pomocí výstupků z nástavce do pasivního chladiče.

### 6.3.3 Regulace průtoku vzduchu

Pro realizaci bezpodporového 3D tisku není citlivost regulace chlazení klíčovým prvkem. Regulaci lze provádět pomocí redukčního ventilu s menší přesností regulace. Pro realizaci velkorozměrového tisku ve formě prutových konstrukcí se naopak chlazení jeví jako stěžejní část tiskové hlavy. Pro zajištění jemnější regulace a určení přesného průtoku vzduchu k okruhu je nutné pořídit jemnější redukční ventil a taktéž proudové a tlakové senzory. Do stávajícího řešení nebyly tyto prvky zabudovány z důvodu vysoké ceny s ohledem na nízkou potřebu pro realizaci bezpodporového tisku.

### 6.3.4 Úchyt tiskové hlavy na vřetení

Tisková hlava je v aktuální konfiguraci připevněna k robotickému ramenu přes vřetení PDS DLC 90 sloužícímu ke generování pohybu nástroje pro robotické Obrábění. Pro zajištění vnitřního chlazení vřetene je v jeho horní části přiveden tlakový vzduch. Zde taktéž do vřetene vstupují kabely od elektroniky. Tyto přírady jsou kryty flexibilní hadicí.

Při tisku s náklonem tiskové hlavy (především u náklonu větším než 60 ° dochází ke kontaktu ochranné hadice s tiskovou hlavou. Aby nedošlo k poškození tiskové hlavy nebo narušení procesu tisku je nutné vizuálně kontrolovat pohyb hadice a případně zabránit kolizi. Řešením se nabízí odpojení připojovacího prvku z vřetene a připevnění hadice dále od tiskové hlavy. Ke konektoru vstupujícímu do vřetene je však připevněna konzola, na které je upevněna cívka s filamentem. Pro tuto část zařízení by tedy bylo nutné najít jiné umístění.

Druhým možným řešením se jeví odstranění vřetene a připevnění tiskové hlavy k hliníkové přírubě, která leží za vřetenem a ke které je aktuálně připevňována tisková hlava z její druhé

strany. Díky odepnutí vřetene se horní částí desky uvolní dva otvory pro šrouby, které je možné využít na připevnění konstrukce nesoucí cívku s filamentem.

### 6.3.5 Maximální náklon tiskové hlavy

Při tisku spirální vázy dochází k progresivnímu nárůstu úhlu převisu. Ideálním případem pro nanášení materiálu je kopírování tohoto úhlu převisu náklonem tiskové hlavy. Toho však kvůli limitům natočení jednotlivých os robotického ramene, nelze docílit ve všech bodech trajektorie. Součástí optimalizace generátoru trajektorie byl vyvinut skript regulující maximální náklon tiskové hlavy. Díky simulaci lze poté nalézt maximální možný náklon tiskové hlavy, při kterém nedojde ke kolizi os robotického ramene. Hodnota maximálního náklonu tiskové hlavy je závislá především na natočení nástroje okolo osy Z, výšce podložky a vzdálenosti tělesa od okraje stolu.

Tab. 6-1: Limity natočení os robotického ramene

Osa	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Max. rozsah (°)	±185	+35/-135	+158/-120	±350	±130	±350

#### Natočení směrového vektoru nástroje

Úhel mezi osou Y lokálního souřadného systému trysky a osou Y globálního souřadného systému zařízení má výrazný vliv na maximální možný náklon tiskové hlavy při tisku spirální vázy. Pro nalezení hodnoty maximálního náklonu v závislosti na natočení nástroje okolo osy Y byla provedena série simulací. Pro tyto účely byla užita spirální váza s progresivním nárůstem úhlu převisu, průměrem spodní podstavy 25 mm a horní podstavy 100 mm. Těleso bylo umístěno do pozice [X=310; Y=555; Z=365]. Na Obr. 6-1. je zobrazen výsledek simulací a průběh hodnoty maximálního náklonu v závislosti na natočení nástroje.

Z grafu je patrný propad hodnot mezi úhly  $-120^\circ$  a  $-85^\circ$ . Příčinou jsou nižší limitní úhly v osách A2, A3 a A5 (viz Tab. 6-1). Při náklonu ve zmíněném intervalu dosahuje vždy jedna ze zmíněných os úhlu, při kterém dosedá na mechanický doraz, který zastaví pohyb ramene a zabráni tak jeho poškození.



Obr. 6-1: Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na směrovém vektoru nástroje



### Výška podložky

Pro vliv výšky podložky na maximální náklon tiskové hlavy bylo užito souřadnic stejných souřadnic X, Y jako v předchozím případě (tzn.  $[X=310; Y=555]$ ). Natočení tiskové hlavy bylo zvoleno na  $-85^\circ$ , jelikož při této hodnotě bylo při předchozích simulaci dosaženo nejvyšší možné hodnoty náklonu. Parametrem při této analýze je souřadnice Z, určující vzdálenost mezi rovinou podložky a referenční rovinou, kterou je svářečský stůl v laboratoři robotického pracoviště.

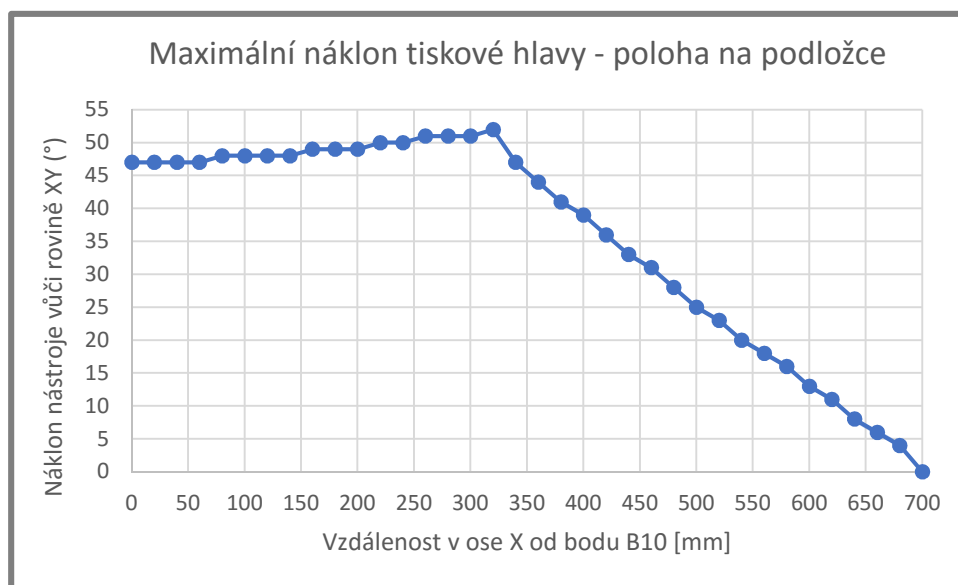
Následující graf (Obr. 6-2) zobrazuje postupný nárůst maximálního možného náklonu tiskové hlavy až do hodnoty  $Z=1100$  mm. Z průběhu grafu je patrný extrém v hodnotě  $Z = 380$  mm, poté dochází ke strmému poklesu hodnot maximálního náklonu nástroje.



**Obr. 6-2:** Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na výšce podložky

### Vzdálenost tělesa

Poslední provedenou simulací bylo určení vlivu vzdálenosti tištěného tělesa od robotického ramene na maximální náklon při tisku spirální vázy. Pro tyto analýzy bylo zvoleno souřadnic  $[Y=555, Z=380]$  a natočení tiskové hlavy okolo osy Z o  $85^\circ$ . Variabilní vzdálenost v ose X mezi tělesem a bodem B10, který leží na pracovním stole v laboratoři robotického pracoviště. Výsledky simulace zobrazují mírný nárůst hodnot maximálního náklonu tiskové hlavy až do hodnoty  $X = 320$  mm. Poté dochází k výraznému propadu hodnot, přičemž maximální hodnota v ose X, při které je robotické rameno schopno vykonat trajektorii je při  $X = 700$  mm.



**Obr. 6-3:** Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na poloze tělesa na podložce

Tyto limity lze odstranit použitím podložky s minimálně jedním stupněm volnosti. Jako řešení se nabízí rotační stůl umístěný v laboratoři robotického 3 tisku, který je vybaven 2 stupni volnosti.



## 7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce na téma *Bezpodporový 3D tisk na 6-osém robotickém rameni* bylo hlavním cílem navrhnout tiskové strategie a realizovat konstrukční úpravy tiskové hlavy.

Realizovány byly tiskové strategie pro tisk 3D skořepinových dílů, které nelze konvenčními způsoby 3D tisku realizovat. Na základě hypotézy o vlivu směru nanášení materiálu byl vytvořen algoritmus pro generování trajektorie tiskové dráhy pro 6osé robotické rameno. Následně provedené experimenty prokázaly výrazné zlepšení vyrobitelnosti dílů s převisy až  $90^\circ$  vůči rovině podložky a  $180^\circ$  vůči gravitačnímu působení. Během experimentů byla potvrzena hypotéza o vlivu náklonu tiskové hlavy vůči tištěnému tělesu.

U zařízení bylo nutné provést konstrukční úpravy trysky a systému chlazení. Díky novému konceptu trysky lze zařízení lépe kalibrovat. Taktéž je umožněno realizovat větší náklon nástroje vůči podložce bez rizika kolize. Systém chlazení nyní umožňuje částečnou regulaci průtoku vzduchu v celém systému a také úplné zamezení průtoku vzduchu směrem na vytištěnou součást.

Algoritmy pro generování trajektorie byly realizovány s ohledem na topologii tělesa. Všechny vytvořené skripty umožňují volbu výšky vrstvy, přesnosti interpolace trajektorie, omezení náklonu tiskové hlavy nebo volbu úhlu natočení tiskové hlavy vůči normále podložky.

Realizace výtisků bez užití podpůrných struktur vykazuje u robotického ramene vysoký potenciál. Pro velkorozměrový tisk jsou podstatné především informace o vlivu adheze na soudržnost tělesa. Navržené trajektorie lze užít i v ostatních oblastech aditivních technologií realizovaných pomocí robotického manipulátoru KUKA KR 60HA.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SHIN, Hwa Seon, Hye In LEE a Euee Seon JANG. An Effective Data Structure for a 3D Printing Slicer API. 2016, 1–4.
- [2] *Slic3r - G-code generator for 3D printers* [online]. 2017 [vid. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://slic3r.org/>
- [3] 3D CONTROL SYSTEMS LTD. *3DPrinterOS* [online]. 2015 [vid. 2017-03-25]. Dostupné z: <https://www.3dprinter-os.com/>
- [4] ULTIMAKER B.V. *Cura 3D Printing Slicing Software - Ultimaker* [online]. 2017 [vid. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>
- [5] WOLFRAM RESEARCH, Inc. *Genus -- from Wolfram MathWorld* [online]. 2017 [vid. 2017-09-10]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/Genus.html>
- [6] *Category:Extruders - RepRap* [online]. 2015 [vid. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Extruder>
- [7] GARG, Ashu, Anirban BHATTACHARYA a Ajay BATISH. On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2015, **6914**(October), 150724213500001. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426914.2015.1070425
- [8] SUN, Q., G.M. RIZVI, C.T. BELLEHUMEUR a P. GU. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2008, **14**(2), 72–80. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540810862028
- [9] SOOD, Anoop Kumar, Asif EQUBAL, Vijay TOPPO, R. K. OHDAR a S. S. MAHAPATRA. An investigation on sliding wear of FDM built parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2012, **5**(1), 48–54. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2011.08.003
- [10] LEE, B. H., J. ABDULLAH a Z. A. KHAN. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, **169**(1), 54–61. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259
- [11] AHN, Sung-hoon, Michael MONTERO, Dan ODELL, Shad ROUNDY a Paul K WRIGHT. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2002, **8**(4), 248–257. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540210441166
- [12] 3DSTRUNY.CZ. *ABS filament / ABS filament Ø 1,75 mm / 3D WORLD tisková struna ABS zelená 1,75 mm 1 Kg / 3Dstruny.cz /3D struny do 3D tiskáren* [online]. 2017 [vid. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.3dstruny.cz/3D-WORLD-tiskova-struna-ABS-zelena-1-75-mm-1-Kg-d152.htm>
- [13] TORRES, Jonathan, José COTELO, Justin KARL a Ali P. GORDON. Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives. *Jom* [online]. 2015, **67**(5), 1183–1193. ISSN 15431851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-015-1367-y
- [14] DOMINGO-ESPIN, Miquel, Josep M. PUIGORIOL-FORCADA, Andres Amador GARCIA-GRANADA, Jordi LLUMÀ, Salvador BORROS a Guillermo REYES. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials and Design* [online]. 2015, **83**, 670–677. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2015.06.074
- [15] ALZAHRANI, Mohammed. *Modification of Recycled Poly ( ethylene terephthalate ) for FDM 3D-Printing Applications by* [online]. B.m., 2017. Waterloo, Ontario, Canada. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10012/11774>
- [16] STRATASYS LTD. *FDM Thermoplastics Material Overview / Stratasys* [online]. 2017 [vid. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

- [17] SOOD, Anoop Kumar, R. K. OHDAR a S. S. MAHAPATRA. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials and Design* [online]. 2010, **31**(1), 287–295. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2009.06.016
- [18] HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YU a Ligang LIU. FrameFab: robotic fabrication of frame shapes. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2016, **35**(6), 1–11. Dostupné z: doi:10.1145/2980179.2982401
- [19] JI SHI. ROBOTIC EXTRUSION(6-Axis KUKA+ABS 3D Printing) on Behance. *Research of Digital Craftsmanship & Autonomous Fabrication* [online]. 2015 [vid. 2017-05-10]. Dostupné z: [https://www.behance.net/gallery/22536831/ROBOTIC-EXTRUSION\(6-Axis-KUKAABS-3D-Printing\)](https://www.behance.net/gallery/22536831/ROBOTIC-EXTRUSION(6-Axis-KUKAABS-3D-Printing))
- [20] JOKIC, S., P. NOVIKOV a J. LAARMAN. *Mataerial* [online]. 2014 [vid. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.mataerial.com/#firstPage>
- [21] AIBUILD. *Ai Build - Projects* [online]. 2018 [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://ai-build.com/projects.html>
- [22] 3DERS.ORG. *AI build uses robotics and artificial intelligence through 3D printing to construct the Daedalus Pavilion View Larger Image* [online]. 2016 [vid. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/ai-build-uses-robotics-and-artificial-intelligence-through-3d-printing-to-construct-the-daedalus-pavilion/>
- [23] BENEDICT. *3ders.org - Zurich students build six-axis 3D printer that can print overhangs without supports* [online]. 2016 [vid. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20170213-zurich-students-build-six-axis-3d-printer-that-can-print-overhangs-without-supports.html>
- [24] STRATASYS LTD. *The Factory of The Future - 3D Demonstrators / Stratasys* [online]. 2018 [vid. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/demonstrators>
- [25] ENGINEERINGZHAW. *ZHAW-Masterstudenten entwickeln sechssachsigen 3D-Drucker - YouTube* [online]. 2016 [vid. 2017-05-21]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=T\\_347m\\_lxes](https://www.youtube.com/watch?v=T_347m_lxes)
- [26] SYSTEMS, Egyrobo for Robotic. *RoboCoaster Robot Applications - EgyRobo for Robotic systems sae* [online]. 2014 [vid. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.egyrobo.com/>
- [27] ŠŮKAL, J, L TĚŠISCKÝ, J. HURNÍK a O. VAVERKA. Robotický 3D tisk nerovnoběžných hladin bez použití podpůrných struktur. *Inženýrský projekt ZKR*. 2016, 37.
- [28] KWON, Hyunchul. *curvoxels* [online]. 2018 [vid. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.curvoxels.com/>
- [29] MUELLER, S., S. IM, S. GUREVICH, A. TEIBRICH, F. PFISTERER, L., GUIMBRETIERE a P. BAUDISCH. *WirePrint: Fast 3D Printed Previews* [online]. 2018 [vid. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://hcie.csail.mit.edu/research/wireprint/wireprint.html>



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Veličina, symbol	Jednotka	Název veličiny, symbolu
B	m	Šířka extrudované stopy
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
d	m	Průměr filamentu
D	m	Průměr hřídele krokového motoru
$F_c$	N	Síla v kontaktu mezi vlákny
$F_g$	N	Tíhová síla vlákna
$F_t$	N	Síla od vytlačování materiálu
H	m	Výška vrstvy
h	m	Délka spotřebovaného filamentu
L	m	Délka elementu
n	$\text{s}^{-1}$	Otáčky krokového motoru
t	s	Doba, za kterou urazí nástroj délku elementu L
$T_g$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota skelného přechodu
$T_v$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota viskozního toku
$v_{kb}$	$\text{m s}^{-1}$	Rychlost koncového bodu nástroje
$V_{\text{trajektorie}}$	$\text{m}^3$	Objem materiálu v elementu
$V_{\text{tryska}}$	$\text{m}^3$	Objem materiálu vedeného do trysky
Z	$\text{K}^{-1}$	Smršťivost
$\alpha$	$^{\circ}$	Úhel převisu vůči rovině podložky
$\lambda$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
$\sigma_o$	MPa	Pevnost v ohybu
$\sigma_t$	MPa	Pevnost v tahu

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
FFF	Fused Filament Fabrication
CAD	Computer aided design
STL	Stereolithography
3MF	3D Manufacturing Format
OBJ	Object File
CNC	Computer Numeric Control
MFI	Index tekutosti taveniny (Melt Flow Index - ang.)
ABS	Acrylonitril-butadien-styren
PLA	Polyactic Acid
PC	Polycarbonate
PET-G	Polyethylene Phthalate Glycol
IAAC	Institute of Advanced Architecture of Catalunya
ZHAW	Zurich University of Applied Sciences
ZKR	Inženýrský projekt
CFM	Kubická stopa za minutu (Cubic feet per minute - ang.)
KCP	Ovládací panelu robotického ramene KUKA (KUKA Control panel - ang.)
PTP	Point-to-Point

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

<b>Obr. 2-1:</b> Rozdělení modelu na vrstvy [1] .....	15
<b>Obr. 2-2:</b> Genus topologie pro 2D tělesa .....	16
<b>Obr. 2-3:</b> Schéma extruderu [6] .....	16
<b>Obr. 2-4:</b> Možné módy spoje mezi dvěma vlákny [8] .....	19
<b>Obr. 2-5:</b> Nanášení materiálu s různou výškou vrstvy .....	19
<b>Obr. 2-6:</b> Robotický 3D tisk prutové konstrukce [18] .....	20
<b>Obr. 2-7:</b> Geometrie prutu (a), zesílení pavoučí sítě (b) [19] .....	21
<b>Obr. 2-8:</b> Pozice trysek pro přídatná vlákna v krajních polohách [19] .....	21
<b>Obr. 2-9:</b> Nanášení materiálu dle popsané geometrie [19] .....	22
<b>Obr. 2-10:</b> Schéma zařízení na Tsinghua University [19] .....	23
<b>Obr. 2-11:</b> Zařízení na IAAC Barcelona [20] .....	24
<b>Obr. 2-12:</b> Zařízení AI Build [22] .....	24
<b>Obr. 2-13:</b> Zařízení Stratasys 3D Demonstrator [24] .....	25
<b>Obr. 2-14:</b> Zařízení EgyRobo [26] .....	25
<b>Obr. 2-15:</b> Zařízení Curvoxels [28] .....	26
<b>Obr. 2-16:</b> Zařízení WirePrint [29] .....	26
<b>Obr. 2-17:</b> Zařízení na ZHAW [23] .....	27
<b>Obr. 2-18:</b> CAD model tiskové hlavy z projektu ZKR 2016 [27] .....	28
<b>Obr. 2-19:</b> Obálkový kužel (a), nakloněná hlava vůči podložce (b) [27] .....	29
<b>Obr. 2-20:</b> Elektronika k ovládání tiskové hlavy [27] .....	29
<b>Obr. 2-21:</b> Převod bitové informace z termistoru na hodnotu teploty [27] .....	30
<b>Obr. 2-22:</b> Skript pro generování trajektorie [27] .....	30
<b>Obr. 3-1:</b> Tiskové vady z řešení projektu ZKR 2016 [27] .....	31
<b>Obr. 4-1:</b> Schéma zařízení robotického 3D tisku .....	33
<b>Obr. 4-2:</b> Náklon tiskové hlavy .....	34
<b>Obr. 4-3:</b> Silové působení při nanášení převislého objemu .....	35
<b>Obr. 4-4:</b> Různé roviny podložky .....	36
<b>Obr. 4-5:</b> Silový rozbor – tisk v rovině XZ .....	36
<b>Obr. 4-6:</b> Silový rozbor – tisk v rovině -XY .....	37
<b>Obr. 4-7:</b> Koncept samostatných (a) a spojených (b) těles trysky a heatbloku .....	38
<b>Obr. 4-8:</b> Závislost výšky trysky na úhlu špičky .....	38
<b>Obr. 4-9:</b> Původní (a) a nová (b) konstrukce trysky s heatblokem .....	39
<b>Obr. 4-10:</b> Tryska (vlevo) a kalibrační nástavec (vpravo) .....	40
<b>Obr. 4-11:</b> Chlazení ventilátory – původní (a), stlačeným vzduchem (b) .....	41
<b>Obr. 4-12:</b> Varianta A – regulace 1 škrťacím ventilem .....	41
<b>Obr. 4-13:</b> Varianta B – regulace škrťacím a 2/2 ventilem .....	42
<b>Obr. 4-14:</b> Varianta C – regulace škrťacím a 3/2 ventilem .....	42
<b>Obr. 4-15:</b> Varianta D – regulace 2 škrťacími ventily .....	43
<b>Obr. 4-16:</b> Pneumatický systém chlazení tiskové hlavy .....	44
<b>Obr. 4-17:</b> Typy testovacích objektů .....	44
<b>Obr. 4-18:</b> Možné varianty otevřené stěny .....	45
<b>Obr. 4-19:</b> Možné varianty spirální vázy .....	45
<b>Obr. 4-20:</b> Možné varianty zakřiveného tubusu .....	46
<b>Obr. 4-21:</b> Modul pro změnu polohy a měřítka tělesa .....	46
<b>Obr. 4-22:</b> Tvorba kontur .....	47
<b>Obr. 4-23:</b> Funkce Contour .....	47
<b>Obr. 4-24:</b> Trajektorie na otevřené stěně .....	47
<b>Obr. 4-25:</b> Generování řady bodů – otevřená stěna .....	48

<b>Obr. 4-26:</b> Přechod mezi vrstvami – vertikální (a), šikmý (b).....	48
<b>Obr. 4-27:</b> Strmost přechodu v závislosti na počtu vynechaných bodů.....	48
<b>Obr. 4-28:</b> Generování řady bodů – spirální váza.....	49
<b>Obr. 4-29:</b> Trajektorie na spirální váze .....	49
<b>Obr. 4-30:</b> Trajektorie na zakřiveném tubusu .....	50
<b>Obr. 4-31:</b> Problém se vzdálenosti mezi konturami u zakřiveného tubusu .....	50
<b>Obr. 4-32:</b> Nastavitelnost maximálního náklonu tiskové hlavy .....	51
<b>Obr. 4-33:</b> Skript pro náklon tiskové hlavy .....	51
<b>Obr. 4-34:</b> Natočení směrového vektoru tiskové hlavy .....	51
<b>Obr. 4-35:</b> Optimalizace směrového vektoru.....	52
<b>Obr. 5-1:</b> Převod bitové informace ze termistoru na teplotu - nová verze.....	55
<b>Obr. 5-2:</b> Vzorek pro určení rychlosti tisku .....	56
<b>Obr. 5-3:</b> Testovací objekty – tloušťka stěny.....	57
<b>Obr. 5-4:</b> Vzorek vytištěný bez chlazení (a) a s chlazením (b).....	58
<b>Obr. 5-5:</b> Vzorek s výškou vrstvy 1,5 mm (a), 0,7 mm (b) .....	59
<b>Obr. 5-6:</b> Vytištěný vzorek s vertikálním (a) a šikmým (b) přechodem mezi vrstvami .....	60
<b>Obr. 5-7:</b> Tisk otevřené plochy .....	60
<b>Obr. 5-8:</b> Vzorek 1 .....	61
<b>Obr. 5-9:</b> Vzorek 2 .....	61
<b>Obr. 5-10:</b> Vzorek 3 .....	62
<b>Obr. 5-11:</b> Vzorek 4 .....	63
<b>Obr. 5-12:</b> Vzorek 5 - tisk na rovinu XZ .....	63
<b>Obr. 5-13:</b> Vzorek 6 - tisk v rovině -XY bez náklonu tiskové hlavy.....	64
<b>Obr. 5-14:</b> Vzorek 7 - tisk v rovině -XY s náklonem tiskové hlavy.....	64
<b>Obr. 5-15:</b> Vzorek 8 – Zakřivená otevřená stěna.....	65
<b>Obr. 5-16:</b> Otevřená plocha na podložce v rovině XZ - vzorek 9 (a), vzorek 10 (b) .....	65
<b>Obr. 5-17:</b> Zakřivený tubus v roviny podložky XY – vzorek 11 (a) a -XY – vzorek 12 (b) .....	66
<b>Obr. 5-18:</b> Tisk zakřiveného tubusu na podložku v rovině -XY.....	66
<b>Obr. 6-1:</b> Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na směrovém vektoru nástroje .....	69
<b>Obr. 6-2:</b> Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na výšce podložky .....	70
<b>Obr. 6-3:</b> Maximální náklon tiskové hlavy v závislosti na poloze tělesa na podložce .....	71

**11 SEZNAM TABULEK**

<b>Tab. 2-1:</b> Porovnání materiálových charakteristik [16] [15].....	18
<b>Tab. 2-2:</b> Porovnání tepelných vlastností materiálů [16].....	20
<b>Tab. 2-3:</b> Parametry driveru krokového motoru DM542A [27] .....	29
<b>Tab. 4-1:</b> Porovnání vlastností konstrukcí trysky s <i>heatblokem</i> .....	39
<b>Tab. 5-1:</b> Procesní parametry – vliv množství extrudovaného materiálu .....	57
<b>Tab. 5-2:</b> Nezávislost pohybu na počtu bodů.....	57
<b>Tab. 5-3:</b> Procesní parametry tisku – vliv chlazení.....	58
<b>Tab. 5-4:</b> Procesní parametry – vliv výšky vrstvy .....	58
<b>Tab. 5-5:</b> Strategie tisku - spirální váza v rovině XY .....	61
<b>Tab. 5-6:</b> Spirální váza na podložce XY – vzorky .....	62





## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1**    Algoritmus pro generování trajektorie
- Příloha 2**    Digitální model tiskové hlavy
- Příloha 3**    Výkres sestavení tiskové hlavy
- Příloha 4**    Fotografická dokumentace z experimentů